



03  
2026

Information Science and Engineering Research

# 信息科学与工程研究

Volume 7 Issue 3 March 2026 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
Tel.: +65 65881289  
E-mail: [contact@nassg.org](mailto:contact@nassg.org)  
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：信息科学与工程研究

ISSN: 2737-4815 (纸质) 2737-4823 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/iser

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Information Science and Engineering Research

ISSN: 2737-4815 (Print) 2737-4823(Online)

Language: Chinese

URL: http://journals.nassg.org/index.php/iser

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《信息科学与工程研究》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: http://www.nassg.org



### 期刊概况：

中文刊名：信息科学与工程研究

ISSN: 2737-4815 (Print) 2737-4823(Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/iser

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 信息科学与工程研究

Information Science and Engineering Research

主 编

陈惠芳

浙江大学，中国

编 委

彭照阳 Zhaoyang Peng

李 砚 Yan Li

朱朝阳 Chaoyang Zhu

房锐波 Ruibo Fang

张 力 Li Zhang

- 1 基于大数据的通信工程信息化服务优化  
/ 王麒超
- 4 自然资源数据库构建高级持续性威胁监测体系  
/ 马晓娟 苏楠 田志鹏 叶姗姗
- 7 基于光纤通信技术下的电子通信安全技术分析  
/ 赵海伟
- 10 全场景覆盖与高体验承载：全光无线网破解智慧校园困局的实践路径  
/ 薛飞
- 13 嵌入式计算硬件方案工业场景下的可靠性与验证体系  
/ 刘来友
- 16 浅析智慧广电网络应急广播关键技术  
/ 范瑜
- 19 软件开发数据库隐私数据泄露识别对策研究  
/ 李彦会
- 22 集中式存储网络性能评估：RDMA over Converged Ethernet（RoCE）与光纤通道（FC）的对比研究  
/ 屈永康 孙轶哲 张健 李孟
- 26 基于动态可信度与时空特征的多源威胁情报融合方法研究
- 30 融合黑寡妇优化与记忆引导的混合蚁群算法求解旅行商问题  
/ 高宏 李迎春
- 33 TR 组件射频性能稳定性测试与可靠性评估研究  
/ 肖海东 高江旭
- 36 基于数字化转型的人社社保政务流程再造与效能提升研究  
/ 张胜
- 39 系统工程视角下铁路列车运行智能控制系统设计与实现  
/ 姜小彬
- 42 深度学习驱动下无人机航拍影像在桥梁检测中的智能化应用  
/ 黄滢彬
- 45 基于 Python 算法的实景三维与 BIM 融合在道桥施工智能化管理中的应用研究  
/ 胡振程
- 48 城市轨道交通 CBTC 系统中无线通信抗干扰算法的优化设计  
/ 路正凤

- 1 Optimization of Information Service of Communication Engineering Based on Big Data  
/ Qichao Wang
- 4 Construction of a High-level Persistent Threat Monitoring System for the Natural Resources Database  
/ Xiaojuan Ma Nan Su Zhipeng Tian Shanshan Ye
- 7 Analysis of Electronic Communication Security Technology Based on Optical Fiber Communication Technology  
/ Haiwei Zhao
- 10 Full-Scenario Coverage and High-Performance Support: Practical Solutions for Smart Campus Challenges through All-Optical Wireless Networks  
/ Fei Xue
- 13 Reliability and Verification System of Embedded Computing Hardware Solutions in Industrial Scenarios  
/ Laiyou Liu
- 16 Analysis of Key Technologies of Emergency Broadcasting in Smart Radio and Television Network  
/ Yu Fan
- 19 Research on Identification Countermeasures of Database Privacy Data Leakage in Software Development  
/ Yanhui Li
- 22 Performance Evaluation of Centralized Storage Network: A Comparative Study of RDMA over Converged Ethernet (RoCE) and Fibre Channel (FC)  
/ Yongkang Qu Yizhe Sun Jian Zhang Meng Li
- 26 Research on Multi-source Threat Intelligence Fusion Based on Dynamic Credibility and Spatio-temporal Features  
/ Ruili Li
- 30 A hybrid ant colony algorithm based on black widow optimization and memory guidance for solving traveling salesman problem  
/ Hong Gao Yingchun Li
- 33 Research on RF Performance Stability Test and Reliability Evaluation of TR Components  
/ Haidong Xiao Jiangxu Gao
- 36 Research on the Rerouting and Efficiency Enhancement of Human Resources and Social Security Service Processes through Digital Transformation  
/ Sheng Zhang
- 39 Design and Implementation of Intelligent Control System for Railway Train Operation from the Perspective of System Engineering  
/ Xiaobin Jiang
- 42 Intelligent Application of UAV Aerial Photography in Bridge Detection Driven by Deep Learning  
/ Yingbin Huang
- 45 Application Research of Real-scene 3D and BIM Fusion in Intelligent Management of Road and Bridge Construction Based on Python Algorithm  
/ Zhencheng Hu
- 48 Optimization Design of Anti-interference Algorithm for Wireless Communication in Urban Rail Transit CBTC System  
/ Zhengfeng Lu

# Optimization of Information Service of Communication Engineering Based on Big Data

Qichao Wang

China Communications Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd. Eastern Information Industry Branch, Hangzhou, Zhejiang, 310016, China

## Abstract

With the rapid expansion of China's communication infrastructure and telecom service systems, the traditional informatization service system for communication engineering faces challenges such as increasing network complexity, diversified user services, and the coexistence of demands for improving operation and maintenance efficiency and service quality. This paper first defines the connotation of informatization services for communication engineering, then analyzes the potential value of optimizing informatization services for communication engineering based on big data technology, starting from the current development status of the communication industry under the background of "big data + communication" integration. It focuses on exploring the improvement of network optimization, service quality management, user behavior analysis, fault prediction, and resource scheduling capabilities through big data methods. The article further proposes five actionable optimization measures suitable for China's national conditions, combining practical experiences of typical operators in network big data platform construction, data sharing architecture design, intelligent operation and maintenance, real-time monitoring, and feedback mechanism construction.

## Keywords

big data; communication engineering; information service; optimization; significance; measures

# 基于大数据的通信工程信息化服务优化

王麒超

中国通信建设第二工程局有限公司东部信息产业分公司, 中国·浙江 杭州 310016

## 摘要

随着中国通信基础设施与电信服务体系快速扩展,传统通信工程信息化服务体系面临网络复杂性增加、用户业务多样化以及运维效率与服务质量提升需求并存的挑战。本文首先界定通信工程信息化服务的内涵,随后从通信行业在“大数据+通信”融合背景下的发展现状出发,分析基于大数据技术对通信工程信息化服务优化的潜在价值,重点探讨通过大数据手段提升网络优化、服务质量管理、用户行为分析、故障预测与资源调度能力。文章进一步提出适合中国国情的五项可落地优化措施,并结合典型运营商在网络大数据平台建设、数据共享架构设计、智能化运维、实时监测与反馈机制构建等方面的实践经验。

## 关键词

大数据; 通信工程; 信息化服务; 优化; 意义; 措施

## 1 引言

在经济社会迅猛发展背景下,通信工程得到了极大程度的拓展,然而实践中使用的可预测性出现了问题,导致通信系统难以满足用户的实际需要,并且还会出现卡顿或信息接收延迟等情况。基于大数据的通信工程信息化服务是一种全新的方式,能够很好地优化通信工程信息化服务不足<sup>[1]</sup>。因此,为全面提升通信工程信息化服务效率与质量,下文通

过查阅相关文献及结合自身实践下针对基于大数据的通信工程信息化服务优化展开探讨,以供参考。

## 2 通信工程信息化服务概述

通信工程信息化服务是在电信及通信网络建设、运营、维护与管理全过程中,将信息技术与通信工程有机融合,以支撑网络部署、资源管理、业务提供、运维监控与用户服务的一体化服务体系。该服务体系覆盖固定网、移动网、宽带接入、数据通信、IDC / 数据中心运营、网络传输、交换、安全保障、客户服务与运营维护等多个维度。大型运营商(例如中国电信、中国移动通信集团有限公司等)在提供传统电信业务(固定语音、宽带、IP 业务、5G 移动通信等)的同时,也通过其骨干互联网(例如 CHINANET)及遍布

**【作者简介】**王麒超(1980-),男,中国江苏连云港人,本科,高级工程师,从事AI和大数据技术在工程项目管理和节能及新能源业务方面的应用研究。

全国的 IDC 节点、数据中心资源，为企业事业单位、政务机构、企业客户提供包括数据通信、云服务、专线服务、增值业务、网络接入与托管等一体化通信信息服务。

### 3 基于大数据的通信工程信息化服务优化意义

在迈入移动互联网、物联网、云计算和 5G / 下一代通信时代背景下，网络用户数量、接入终端种类、业务类型和数据流量均呈几何级增长，数据类型也由传统语音与窄带数据扩展为高清视频、流媒体、物联网信令、实时通信、企业专线与云服务等多样化形式。移动大数据时代对网络容量、网络部署灵活性、资源调度、实时监控提出更高要求。基于大数据技术的通信工程信息化服务优化，能够借助来自网络节点、终端、传输路径、用户行为、流量统计、信令日志、故障记录等多源数据，通过统一的数据采集、清洗、分析与挖掘能力，对网络状态、用户需求、资源利用效率、潜在故障趋势进行量化评估与预测。对于运营商而言，这不仅可以提升网络优化与资源调度精度、提升网络质量与用户体验，还可以降低网络建设与维护成本、提高网络可靠性与服务响应速度<sup>[2]</sup>。

## 4 基于大数据的通信工程信息化服务优化措施

### 4.1 构建统一网络大数据共享与管理平台

为提升数据整合效率与利用率，应建立统一的大数据共享与管理平台，具体为：首先，数据采集与近源治理。构建覆盖 RAN、Core、传输、IDC 与接入网的分层采集体系，采用统一元模型定义网元属性、测量指标与事件语义，前端接入采用协议适配器与轻量化采集代理并引入消息总线与分区化 Kafka 主题进行流式传输，入湖前执行基于规则与统计模型的清洗、异常插补与时间序列对齐，并对时延敏感数据在近源缓存进行边缘聚合和压缩编码以降低回传带宽并提升实时判别能力，同时在采集层实现差分隐私与联邦学习准备机制并结合密钥管理与透明加密以满足合规要求。其次，统一中台与目录化管理。构建存储计算分离的数据中台，采用对象存储与分布式列式存储格式如 Parquet 与 ORC，基于分层命名空间实现原始层、规范层与服务层逻辑分区，建立数据目录、元数据服务与血缘追踪机制对数据质量评分、接入凭证与 RBAC 策略进行编目管理，面向网优、故障定位与容量预测等场景提供语义化 RESTAPI、GraphQL 接口与事件流订阅能力并通过元数据驱动的自动化模型注册与 CI/CD 流水线保障应用按需建模与可追溯性。最后，实时可视与闭环运维。基于流批一体化计算引擎与 AIOps 框架实现实时网络感知、异常自学习与离线深度分析的协同工作，设计以多级告警驱动的工单自动化流程与模型评估回执机制，通过策略引擎将 AI 推理结果转化为可执行调度或配置变更并注入南向调度平台，依托容器化编排与作业调度保障任务弹性与隔离，构建多维 SLA 与 KPI 监测仪表盘、权限分级的可视化界面与基于血缘的效果回溯流程以支持跨部

门联动处置与模型迭代更新并结合运维知识库与专家规则库以提升处置精度。

### 4.2 运用数据分析与机器学习进行网络性能监测与预测性维护

在大数据平台框架下构建面向网络性能的异构时序数据湖，统一采集网元指标、信令日志、故障告警与用户行为样本，在边缘侧完成分层预处理以解决噪声、缺失与时间对齐等问题，并引入空间映射变量以刻画小区覆盖与用户分布。基于统计学习与集成机器学习，制定多尺度特征工程策略，包括短时功率谱、流量周期分解、CUSUM 突变统计量与业务耦合矩阵，并使用 L1 正则化与贪心子序列选择减少冗余特征以保证在线推理性能。异常检测采用自监督重构网络与图神经网络联合判别，利用重构误差与网络邻接约束进行交叉校验以降低误报率，并输出拥塞、链路衰退或设备退化的概率化告警。负荷与性能预测融合长短期记忆网络与贝叶斯结构化预测，接入气象、活动日历与移动人口热力图作为外生校正因子，在重要时段通过场景仿真评估调度策略的鲁棒性与回退方案。故障概率评估采用生存分析与因果发现方法识别高危模组，并结合 MEC 侧的近实时推断提出具体运维动作，如基站覆盖微调、切片资源重编排与天线波束预调。决策层将概率评分与成本函数输入运维调度引擎以生成可执行工单与资源迁移建议，并通过可解释性面板呈现特征贡献以支持人工复核。模型管理通过 CI/CD 流水线实现训练、回归测试与分版本控制，采用在线 A/B 与灰度发布评估模型实际效果并对推理延迟与资源占用进行约束，以保证生产环境稳定性<sup>[3]</sup>。建立严格的数据治理与标签质量控制流程，对采集通道进行时序一致性检验并用差分隐私与访问控制保护用户敏感信息，同时构建运维反馈通路以利用人工工单标签提升模型精度。将预测指标与业务 KPI 及 SLA 映射，制定分级响应策略与阈值，明确调度窗口、回退流程与跨域联动机制以便在高风险情形下迅速执行资源重配置。

### 4.3 实时网络状态可视化与动态资源调度机制

基于统一数据枢纽，构建分层可视化体系，将网络拓扑、基站负荷、传输链路吞吐率、信令面强度、流量热力图、业务类型矩阵、用户接入谱与安全告警流整合为多尺度仪表盘，采用流式处理管线对接网元性能计数器与采样探针，利用时间序列数据库与稀疏索引实现毫秒级指标更新，从而保证可视层具有时序一致性与可交互钻取能力。基于可视化输出，设计闭环调度引擎，分设策略层、预测层与执行层，策略层根据业务等级与 SLA 约束定义优先级，预测层基于历史大流量事件与在线学习模型预测热点演化，执行层以 SDN/NFV 与 BGP/MPLS 编排能力实施流量迁移与链路重路由。资源分配采用算力—带宽耦合调度策略，在云、边、端三层引入弹性资源池，实现频谱重配置、载波聚合与边缘卸载的协同调度，调度决策采用凸优化与在线 Lyapunov 方法联合约束处理时延与能耗指标，并引入任务等级分段策略，

确保关键政企与低时延业务获得确定性保障。系统工程上构建可追溯变更与回滚机制，依托可观测性代理与灰度验证模块完成调度前影响评估，调度执行通过南向北向接口联动网管与云管平台，支持事务化下发与回退。数据治理实施流数据语义化标准、元数据目录与隐私脱敏流水线，并以策略驱动流速限制和异常检测保护控制平面，构建 SLA 指标闭环与实时告警策略，结合运营级 AIOps 实现异常自愈与故障定位，并通过指标回传持续校准预测模型。

#### 4.4 融合大数据与智能运维平台，实现自动化与智能化服务保障

基于大数据的智能运维平台应构建多层次数据中台与时序指标湖，统一采集业务、网元、链路、拓扑、探针、用户行为与安全日志，并对原始流进行 ETL 与语义化标注以保障可审计的数据链路与可重现的训练集。平台需基于特征工程与自动化特征商店提取多维服务指纹，结合层次聚类与特征重要性评估形成故障模式字典并入库用于检索。运维决策层应将监督学习、半监督异常检测与因果推断联合编排，构建根因图谱和置信度驱动的干预策略，以支持在多模态指标异常时实现分钟级定位并生成带参数化修复脚本。规则引擎与自动化编排器须采用声明式策略语言描述任务拓扑，并通过有向无环任务流和事务化回滚机制实现变更的安全执行与灰度发布。对于安全事件、DDoS 及用户集中接入等突发场景，应部署在线学习模块与自适应置信阈，结合流量指纹、行为聚类与溯源算法快速分割异常流并触发链路调度或黑洞策略。为提升复杂场景推理能力，应将行业专用大模型与场景化知识库融合，采用少样本微调、知识蒸馏和领域自监督训练以减小概念漂移，同时构建数字孪生沙箱在非生产环境完成策略回归验证。运维闭环需实现观测、诊断、决策、执行与复盘五阶段流水线，复盘以因果回归与离线 AB 实验评估策略效果并将模型权重与规则库自动更新，纳入 SLA 与关键 KPI 的反馈闭环，并通过多租户权限控制与差分隐私技术保证数据隔离与合规<sup>[4]</sup>。

#### 4.5 利用用户行为与业务数据进行服务质量管理与个性化服务优化

基于用户行为与业务数据的服务质量管理与个性化优化，应首先建立覆盖接入侧、承载侧与应用侧的融合数据平台，明确数据口径并实施端到端 ETL 流水线与元数据登记，做到会话级时序对齐、终端指纹标注、业务码流分类与差分隐私脱敏以满足合规要求。基于此，采用多维标签体系并

结合谱聚类与分层贝叶斯模型对用户群体进行精细化分层，利用行为序列的隐马尔可夫模型与双向 LSTM 抽取会话态势特征并将特征部署到在线特征商店供实时推荐与策略决策调用。资源调度层需引入多目标优化调度器，以带权重的吞吐、时延与公平性目标对承载路径与片内资源进行联合优化，并在控制面部署策略回退与事务回滚机制以保障变更安全。对于高价值与政企用户，应提供端到端切片或虚拟专线，结合流量镜像、被动测量与主动探测完成 SLA 持续测量，并在阈值触发时自动申请带宽调度或下发 PCRF 与 PCF 策略。个性化业务侧通过因果推断与多轮离线 AB 试验评估不同资费与套餐对行为的长期影响，并将验证结果以在线学习方式同步至推荐引擎与计费系统以实现闭环优化<sup>[5]</sup>。运维层需在边缘部署实时流处理框架以支撑毫秒级的流量指纹识别与异常溯源，同时与 CDN 及 MEC 协同实现业务侧就近调度以降低末端时延。采用模型治理与漂移检测机制定期回溯特征有效性，并通过离线 OLAP 分析与在线 Flink 管道协同完成策略灰度验证与滚动发布。

## 5 结语

综合来看，伴随通信网络结构的复杂化、用户规模的激增与业务形态多样化，传统通信工程信息化服务体系难以满足高效率、高质量、智能化、灵活化的需求。基于大数据技术，通过构建统一数据平台、运用数据分析与机器学习、实现实时监控与动态调度、融合智能运维，以及依据用户行为优化服务质量，能够为通信工程信息化服务优化提供科学、可操作且贴近中国国情的路径。随着大数据基础设施不断完善、数据治理与合规机制不断健全，基于大数据的通信工程信息化服务优化将成为推动通信行业可持续发展与服务质量提升的重要手段。

## 参考文献

- [1] 李英.基于大数据的通信工程信息化服务优化与提升研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(011):000.
- [2] 李龙.大数据的通信工程信息化服务优化与提升[J].数字化用户, 2024(8).
- [3] 姬建新.基于大数据技术的通信工程项目管理[J].大科技, 2024(17).
- [4] 修健.基于大数据的移动通信网络优化[J].电子技术与软件工程, 2023.
- [5] 李坤浩,叶浩颖.基于大数据分析的电信通信工程网络性能优化研究[J].信息与电脑, 2025, 37(2):10-12.

# Construction of a High-level Persistent Threat Monitoring System for the Natural Resources Database

Xiaojuan Ma<sup>1</sup> Nan Su<sup>2</sup> Zhipeng Tian<sup>3</sup> Shanshan Ye<sup>1</sup>

1. Natural Resources Information Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia, 750000, China

2. National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center Ningxia Branch, Yinchuan, Ningxia, 750000, China

3. Ningxia Hui Autonomous Region Ecological Environment Information and Emergency Center, Yinchuan, Ningxia, 750000, China

## Abstract

Advanced Persistent Threats pose a severe challenge to the secure operation of natural resource databases. Their characteristics of concealment, persistence, and destructiveness can easily lead to data leakage, tampering, and system paralysis, threatening national resource security and the effectiveness of ecological governance. To build a scientific and efficient monitoring system, it is necessary to integrate multi-source data fusion, intelligent recognition algorithms, and dynamic protection mechanisms to achieve real-time perception, precise positioning, and rapid response to threat behaviors. By establishing a multi-dimensional monitoring indicator system, integrating various types of information such as network traffic, data access logs, and system behaviors, and combining intelligent analysis technology to identify abnormal patterns, a closed-loop management of “perception - analysis - response - optimization” can be formed. This system can effectively enhance the defense capabilities of natural resource databases against advanced persistent threats, ensuring data integrity, confidentiality, and availability, and providing security support for the digital transformation of natural resource management.

## Keywords

Natural resource database; Advanced Persistent Threat; Monitoring system; Data security; Intelligent protection

# 自然资源数据库构建高级持续性威胁监测体系

马晓娟<sup>1</sup> 苏楠<sup>2</sup> 田志鹏<sup>3</sup> 叶姗姗<sup>1</sup>

1. 宁夏回族自治区自然资源信息中心, 中国·宁夏 银川 750000

2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心宁夏分中心, 中国·宁夏 银川 750000

3. 宁夏回族自治区生态环境信息与应急中心, 中国·宁夏 银川 750000

## 摘要

高级持续性威胁对自然资源数据库的安全运行构成严峻挑战, 其隐蔽性、持续性及破坏性特征, 易导致数据泄露、篡改与系统瘫痪, 威胁国家资源安全与生态治理效能。构建科学高效的监测体系, 需融合多源数据融合、智能识别算法与动态防护机制, 实现对威胁行为的实时感知、精准定位与快速响应。通过搭建多维度监测指标体系, 整合网络流量、数据访问日志、系统行为等多类信息, 结合智能分析技术对异常模式进行识别, 形成“感知-分析-响应-优化”的闭环管理。该体系可有效提升自然资源数据库对高级持续性威胁的防御能力, 保障数据完整性、保密性与可用性, 为自然资源管理数字化转型提供安全支撑。

## 关键词

自然资源数据库; 高级持续性威胁; 监测体系; 数据安全; 智能防护

## 1 引言

在数字化技术深度融合自然资源管理领域的进程中,

【基金项目】宁夏自然资源科技创新资金支持“宁夏自然资源业务系统被攻击画像识别技术研究”(项目编号: ZRZYTKY202501004)。

【作者简介】马晓娟(1989-), 女, 回族, 中国宁夏同心人, 本科, 高级工程师, 从事信息化网络安全研究。

数据库已然成为承载、管控与解析资源数据的核心平台, 其稳定运行直接影响着资源治理的科学性与公信力。高级持续性威胁持续迭代, 令数据库直面隐蔽入侵、长期潜伏、深度破坏等一系列风险, 传统安全防护方式难以匹配其复杂特性与持续威胁态势。构建契合自然资源数据库特质的高级持续性威胁监测体系, 成为保障数据安全、维系资源管理秩序的核心任务, 亟待从技术与管理两个维度开展系统性探究。

## 2 自然资源数据库高级持续性威胁的现存问题

### 2.1 威胁行为隐蔽性与持续性加剧监测难度

高级持续性威胁针对自然资源数据库的攻击具备显著的隐蔽渗透与长期潜伏特性，其行为轨迹和正常业务操作高度重合，很难依靠单一特征匹配来识别。攻击者常利用合法的资源管理系统接口、数据交换协议或第三方工具，凭借零日漏洞或未授权访问手段逐步渗透，在数据库系统内搭建隐蔽控制通道，达成数据的长期窃取与篡改<sup>[1]</sup>。这类威胁的持续性不只是攻击周期的延长，更体现在对数据库底层架构的深度植入，攻击者通过修改存储过程、植入恶意脚本或调整数据索引，让威胁行为在不触发明显告警的情况下持续存在，形成“潜伏-探测-破坏”的渐进式攻击链条，对监测体系的实时表现与精准程度提出极高要求。

### 2.2 监测指标体系覆盖不全存在识别盲区

自然资源数据库融合地理信息、资源权属、生态环境等多类敏感数据，威胁场景复杂多样，但当前监测体系存在指标覆盖不全问题。数据层面上，攻击者会通过窃取、篡改、伪造等手段破坏数据完整性，或借权限提升、越权访问获取敏感资源信息，需依托数据访问日志、操作审计记录、数据哈希校验等多维度指标开展监测；系统层面上，数据库运行状态、网络流量、进程行为等参数出现异常波动，可能暗示攻击者已实施渗透或破坏行为，需搭建实时系统状态监测指标。现有监测手段仅关注单一网络流量或权限管理维度，缺乏对数据全生命周期、系统底层架构及业务逻辑的多维度指标整合，使得对高级持续性威胁的识别存在明显盲区。

### 2.3 传统防护手段难以应对高级威胁

传统安全防护手段像防火墙、入侵检测系统、访问控制列表等，在应对高级持续性威胁时有着明显局限。防火墙与访问控制列表依靠端口、地址等静态规则开展访问控制，很难识别动态策略攻击行为；入侵检测系统依托已知攻击特征库，对零日漏洞或变种攻击的识别能力不足，容易出现漏报或误报。自然资源数据库的业务特性要求数据具备高可用性与实时性，传统防护手段的部署会增加系统负载，影响数据查询与分析效率，造成“安全与效率”的矛盾。高级持续性威胁的攻击行为有着强适应性，能够绕过传统防护机制、修改攻击特征持续发起攻击，使得传统防护手段无法形成有效防御闭环，难以满足数据库长期安全运行的需求。

### 2.4 数据泄露篡改对资源管理影响加剧

自然资源数据库中的数据涉及土地资源、矿产资源、水资源等核心资源的权属信息、分布情况、开发利用规划等敏感内容，一旦出现数据泄露或篡改，会直接影响资源管理的科学性与权威性。高级持续性威胁的攻击目标包含数据窃取，还涵盖恶意篡改，修改资源权属信息、伪造生态环境监测数据等，这类行为会造成资源管理决策失误，甚至引发社会矛盾。数据泄露的隐蔽性让相关事件往往难以被及时察觉，等到察觉时攻击者已完成数据转移与销毁，形成不可逆

损失。数据泄露还可能使国家资源安全面临风险，尤其是跨境资源数据、战略资源数据等敏感领域，高级持续性威胁的攻击行为会对国家资源安全与生态治理效能构成严重威胁。

## 3 自然资源数据库高级持续性威胁监测体系构建路径

### 3.1 搭建多源数据融合监测指标体系

监测指标体系是构建高级持续性威胁监测体系的核心基础，需结合自然资源数据库业务特性与威胁场景，构建多维度、全链条的监测指标体系<sup>[2]</sup>。数据层指标涵盖数据访问日志、数据修改记录、数据传输流量、数据哈希值等，对数据全生命周期开展监测，实现对数据窃取、篡改、伪造等行为的识别；系统层指标包括数据库运行状态、进程行为、网络流量、权限配置等，对系统底层架构开展监测，实现对攻击者渗透、植入恶意脚本等行为的感知；业务层指标涵盖资源管理业务操作流程、数据查询频率、业务逻辑异常等，对业务逻辑开展监测，实现对攻击者利用业务漏洞攻击的识别。通过数据访问日志与系统权限配置的关联分析，识别未授权访问、越权访问等异常行为；通过数据传输流量与业务操作频率的关联分析，识别数据窃取、批量导出等异常行为。结合威胁情报数据，对监测指标动态调整，及时纳入新的威胁场景与攻击特征，确保指标体系的全面性与时效性。

### 3.2 智能识别机制构建

为实现对高级持续性威胁的精准识别，需构建基于智能分析的异常行为识别机制，通过多源监测数据分析，识别与正常行为存在显著差异的异常模式。该机制以多源数据融合指标体系为基础，整合网络流量、系统日志、业务操作等多类信息，形成覆盖数据、系统、业务的立体化监测维度。智能识别机制的核心在于构建异常行为特征库，通过对历史威胁数据的深度分析，提炼出未授权访问、数据篡改、恶意脚本植入等典型攻击行为的特征参数。该机制引入自适应分析算法，对实时监测数据进行动态比对，通过算法对数据访问、系统运行、业务操作等维度的参数进行实时分析，快速识别偏离正常行为模式的异常信号<sup>[3]</sup>。为提升识别效果，需建立特征库动态更新机制，结合威胁情报的最新动态，及时将新型攻击行为的特征参数纳入识别体系，确保机制能够适应高级持续性威胁的演化趋势，有效弥补传统监测手段的识别盲区。

### 3.3 动态防护机制设计与部署

动态防护机制是实现高级持续性威胁快速响应的核心，需结合监测体系运行状态，设计并部署具备自适应能力的动态防护机制。防护策略制定遵循“最小权限”“最小暴露”原则，通过优化数据库权限配置，限制用户访问权限，规避因权限过大引发的安全风险。动态防护机制拥有实时响应能力，监测到异常行为后会自动触发防护策略，阻断威胁行为持续发展。监测到未授权访问行为时，系统自动锁定相关账

户,限制其访问权限;监测到数据篡改行为时,系统自动恢复数据原始状态,并触发告警机制。动态防护机制具备自适应能力,能够依据威胁行为演化趋势,自动调整防护策略,增强防护的针对性与有效性。防护机制部署进程中,结合数据库业务特性,采用分层防护策略,在网络层、系统层、应用层等多个层面部署防护措施。网络层部署入侵检测系统、防火墙等设备,实现网络流量的实时监测与过滤;系统层部署终端防护软件、漏洞扫描工具等,实现系统漏洞的及时修复与防护;应用层部署数据加密、访问控制等技术,实现数据的安全保护。

### 3.4 闭环管理体系构建

为实现对高级持续性威胁的全生命周期管理,需构建“感知-分析-响应-优化”的闭环管理体系,形成监测体系的持续改进机制。感知层是监测体系的基础,通过多源数据融合与智能识别机制,实现对威胁行为的实时感知;分析层是监测体系的核心,对感知到的异常行为进行深度分析,确定威胁的类型、来源、影响范围等信息;响应层是监测体系的关键,根据分析结果采取相应防护措施,阻断威胁行为进一步发展;优化层是监测体系的保障,对监测体系的运行效果进行评估与优化,提升监测体系的性能与安全性。同时建立监测体系评估机制,定期对监测体系的运行效果进行评估,包括识别准确率、响应时间、防护效果等指标,根据评估结果对监测体系进行优化与改进,提升监测体系的性能与安全性。

## 4 监测体系的应用成效

### 4.1 威胁识别能力与响应效率显著提升

监测体系的构建与应用,让自然资源数据库对高级持续性威胁的识别能力与响应效率实现显著提升。该体系依托多源数据融合与智能识别机制的协同运作,能够精准捕捉隐蔽性强、持续性久的威胁行为,实现对未授权访问、数据篡改、恶意脚本植入等典型攻击行为的有效识别,有效弥补了传统监测手段的识别盲区。在响应效率层面,体系可实现对异常行为的实时感知与快速处置,在威胁行为初期阶段即可阻断其进一步发展,大幅缩短了威胁处置的时间周期,有效降低了数据泄露与系统瘫痪的风险,提升了数据库安全防护的时效性与主动性。

### 4.2 数据安全防护能力全面增强

监测体系落地实施,全面增强了自然资源数据库的安全防护能力。数据安全层面,体系覆盖数据采集、传输、存储、使用等全生命周期环节,通过对数据访问、修改、传输等行为的实时监测,有效防止数据窃取、篡改与伪造,保障数据的完整性、保密性与可用性。系统安全层面,体系可实时监

测数据库运行状态与系统漏洞,及时发现并预警潜在风险,助力相关部门快速修复漏洞,避免攻击者利用漏洞实施渗透攻击。权限管理层面,体系通过对用户权限的精细化管控,实现最小权限原则的落地,有效规避因权限过大引发的安全风险,构建起多层次、全方位的数据安全防护屏障。

### 4.3 资源管理业务稳定性与可靠性提升

监测体系的应用为自然资源数据库的安全稳定运行提供了坚实保障,显著提升了资源管理业务的稳定性与可靠性。业务稳定性方面,体系实时监测数据库运行状态,能够及时发现并处置系统异常,有效避免因系统故障导致的业务中断,保障了资源管理工作的连续性。业务可靠性方面,体系通过对数据完整性与准确性的严格把控,有效防止数据篡改与伪造,确保资源管理业务决策依据的真实性与可靠性,为资源规划、权属管理、生态治理等工作提供了精准的数据支撑。体系构建的安全运行环境,进一步提升了业务处理的效率与质量,推动资源管理工作的规范化与高效化。

### 4.4 应急处置能力与风险预警水平提高

监测体系的应用,大幅提升了自然资源数据库的应急处置能力与风险预警水平。在应急处置方面,体系可快速响应威胁事件,通过自动化防护策略的触发,及时阻断威胁行为的蔓延,有效降低事件造成的损失。在风险预警方面,体系能够实时监测数据库运行状态与威胁行为演化趋势,提前识别潜在安全风险并发出预警,为资源管理部门提供及时的风险提示,便于相关部门提前制定防护措施,实现从被动应对到主动防御的转变,有效提升了数据库的安全防控能力。

## 5 结语

自然资源数据库作为资源管理的核心基础设施,其安全防护能力直接关系到国家资源安全与生态治理效能。高级持续性威胁的复杂性与隐蔽性,对监测体系的构建提出了更高要求。本研究构建的监测体系通过整合技术与管理手段,实现了对威胁行为的全生命周期管理,有效提升了数据库的安全防御水平。未来,需持续关注威胁演化趋势,推动监测技术的创新与应用,不断完善体系的闭环管理机制,为自然资源数字化管理提供坚实的安全支撑,助力资源治理能力的现代化发展。

### 参考文献

- [1] 韦峻峰,陈晨,杨莉.面向运营商网络的APT一体化监测体系研究[J].邮电设计技术,2025,(09):63-69.
- [2] 《2024年全球高级持续性威胁研究报告》发布[J].中国信息安全,2025,(02):84.
- [3] 庞九凤,张亚昊,胡威,等.高级持续性威胁(APT)攻击检测与防御的深度学习研究方法研究[J].办公自动化,2024,29(14):73-76.

# Analysis of Electronic Communication Security Technology Based on Optical Fiber Communication Technology

Haiwei Zhao

Shenyang Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110001, China

## Abstract

Optical fiber communication, with its significant advantages such as wide bandwidth, low loss, and excellent anti-interference ability, has become the core support of modern communication networks. However, it must be pointed out that in many aspects such as link establishment, signal transmission, equipment node operation, and data storage, optical fiber communication is gradually revealing a series of security risks, posing a serious threat to information security. This paper analyzes the basic principles of optical fiber communication and discusses the security protection technologies for electronic communication from multiple dimensions including physical links, optical signals, data transmission and storage, and network architecture.

## Keywords

Optical Fiber Communication; Electronic Communication Security; Network Architecture Optimization

## 基于光纤通信技术下的电子通信安全技术分析

赵海伟

中国联合网络通信有限公司沈阳市分公司, 中国·辽宁 沈阳 110001

## 摘要

光纤通信凭借其带宽宽广、损耗低微以及抗干扰能力卓越等显著优势,已然成为现代通信网络的核心支撑。然而,必须指出的是,光纤通信在链路搭建、信号传输、设备节点运行以及数据存储等诸多环节,正逐渐暴露出一系列安全隐患,对信息安全构成严重威胁。本文分析了光纤通信的基本原理,从物理链路、光信号、数据传输与存储以及网络架构等多个维度,探讨了电子通信的安全防护技术。

## 关键词

光纤通信; 电子通信安全; 网络架构优化

## 1 引言

通信作为社会运行的关键基础设施,在信息传递和经济发展中发挥着重要作用。光纤通信凭借其高速率、大容量和低损耗等突出优势,已成为现代信息传输体系的核心<sup>[1]</sup>。但是,光纤网络在实际部署和运行过程中,也暴露出一系列不容忽视的安全隐患。由于光纤线缆铺设范围广泛,部分区段长期暴露于野外或公共场所,容易遭到蓄意破坏或恶意攻击,影响通信的连续性和可靠性。信号在传输过程中可能面临被窃听、篡改的威胁,敏感数据在存储和转发环节也存在泄露的风险<sup>[2]</sup>。此外,设备自身的安全漏洞、网络架构设计不合理以及运维管理措施不到位,进一步导致整个通信系统的安全风险增加。本文从光纤通信技术基础入手,梳理现有安全防护措施,为后续研究提供支持和参考。

【作者简介】赵海伟(1996-),男,中国内蒙古通辽人,硕士,从事通信研究。

## 2 光纤通信技术核心基础

### 2.1 光纤通信技术原理

光纤通信是一种利用光传递信息的技术,光纤可以看作是“光传播的通道”。光纤通信是将光电信号与电光信号转换完成信号传输和接收。在信息发送端,用激光器等设备将电信号转变为携带信息的光信号,光信号沿光纤依靠“全反射”原理反射前行,能量损耗小,可实现远距离传输。在接收端,用光电二极管将光信号转换为电信号,处理后解读信息。

光纤有三层结构:最内层纤芯是光传播主要路径,由高纯度二氧化硅制成,折射率高使光不易外泄;中间层包层将光约束在纤芯内传播;最外层涂覆层起到了保护作用,增强耐用性。在通信过程中,光信号的传播速度和距离与光纤材料、光源性能及调制解调技术等存在直接关系。

### 2.2 光纤通信技术的主流类型

当前,光纤通信类型非常多,根据传输模式、信号类型以及用途的不同进行划分。每一种分类都意味着光纤通信

在不同场景下的技术特点和功能定位，共同构成了现代通信技术。

按照传输模式划分，可以分为单模和多模两类。单模光纤的线芯极为纤细，直径大约在 8 至 10 $\mu\text{m}$ ，仅允许一种光信号通过。其优势在于损耗较小、传输距离较远且容量较大，适合应用在长距离传输中。按照传输模式划分，可以分为单模和多模两类。单模光纤的线芯极为纤细，直径大约在 8 至 10 $\mu\text{m}$ ，仅允许一种光信号通过。其优势在于损耗较小、传输距离较远且容量较大，适合应用在长距离传输中。多模光纤的线芯相对较粗，通常为 50 $\mu\text{m}$  或 62.5 $\mu\text{m}$ ，所以可以同时传输许多的光模式，但是传输距离比较短，带宽有限，但是成本低且易于安装，所以适合应用在局域网、近距离接入网<sup>[3]</sup>。

按照信号调制方式划分，可以分为数字光纤通信与模拟光纤通信。其中，数字光纤通信采用数字信号，通过对光信号的幅度或频移键控进行调制来传输信息。其优势体现在抗干扰能力强、信号还原度高，且便于进行加密处理。目前，大部分通信应用使用数字光纤通信<sup>[4]</sup>。模拟光纤通信则运用模拟信号，调制光信号的幅度或频率，具有较高的传输效率，但是信号失真风险比较高、抗干扰能力较差，所以仅应用于少数的通信场景。

按照复用技术进行分类，主要存在两种技术，分别为波分复用与时分复用。其中，波分复用是将不同波长的光信号整合至同一根光纤中进行传输，大大提升单根光纤的传输容量。时分复用是把时间划分为多个小段，将多个电信号在不同的时间段内整合为一个光信号进行传输，适合应用中短距离的通信领域。而将波分复用结合时分复用技术，能够提升通信网络的传输效率。

### 2.3 光纤通信技术的优势与局限

与传统电缆和无线通信相比，光纤通信技术有优势也有局限性。在优势方面，首先，光纤通信技术的带宽大、具有更高的传输速率。单模光纤可传输高达几百 THz 的数据，能够满足高清视频、大文件传输以及语音通话等各种需求。当前常用光纤的传输速度已达 100Gbps，部分地区甚至能超过 1Tbps，完全满足当前数字时代的发展需求<sup>[5]</sup>。其次，信号衰减程度低且传输距离长。光在光纤内传播时，能量损耗极小，并且不需要频繁设置中继器，也可以进行远距离不间断传输。最后，具备抗干扰能力。光纤为绝缘材质，不导电且不发射电磁波，尤其适用于工厂、军事等存在强干扰的环境，能够稳定运行，避免信号串扰或受到外界干扰。

光纤通信存在的局限性中，首先是物理层面防护难度较高。光纤线路铺设范围广泛，部分地段如管道外部、电线杆上悬挂的线路均暴露于露天环境，容易遭受人为蓄意破坏受自然灾害损毁，一旦受损通信立即中断。此外，当下私自接入光纤的手段也非常简单，使得物理安全问题更加严重<sup>[6]</sup>。其次，光信号容易被不法分子攻击。当前的窃听技术不断发

展，利用分光耦合或者光纤弯曲等途径，能够非法截取光信号，并且基本难以察觉。

## 3 基于光纤通信的电子通信安全技术

### 3.1 物理链路安全防护技术

#### 3.1.1 线路防护与监测技术

户外光纤线路要想避免自然灾害或者人为破坏，需要将线路埋设至一定深度，或添加管道进行保护；如果是架空线路，则应加装防护套。同时，还需安装光纤监测系统，对光纤的光功率、损耗状况、偏振状态等参数进行实时监测。一旦发现线路出现断裂、弯折，或存在非法接线的情况，系统将立即发出警报，以便维修人员及时进行处理。

#### 3.1.2 非法接入防护技术

采用加密接头与防拆接头等零件，防止他人随意拔插光纤或私自接入分光设备。针对重要区域的光纤线路，将其锁入封闭机柜，并安排专人进行监管，非相关人员不得触碰<sup>[7]</sup>。此外，为每段光纤添加独一无二的专属加密标记，一旦发现未经授权标记接入，系统将立即中断通信，从根本上杜绝非法接入的可能性。

#### 3.1.3 信号泄漏防护技术

在进行光纤布线作业时，应当避免光纤出现过度弯曲的情况，防止发生信号泄漏。在传输重要信息的场景中，选用具备不易发生信号泄漏特性的光纤，降低信号泄漏的程度。必须在光纤的两端安装防护罩，既可以抵御外部信号的干扰，又能够防止他人窃取泄漏的信号。

### 3.2 光信号安全防护技术

#### 3.2.1 光信号加密技术

通信加密存在两种方式：一为链路层加密，二是端到端加密。链路层加密指的是在光纤传输光信号时，直接对光进行加密处理。这一加密方式会变更光的强度、波的相位或者偏振方向等参数，即使中途企图窃取信息者截获信号也无法理解其内容。常见的技术包括光相位加密、光偏振加密，以及当下极为先进的量子密钥分发。该技术运用量子力学原理生成绝对安全的密钥，用于光信号的加密与解密，完全不需要担心被他人窃听。即便密钥被盗用，也无法解开密文。目前，政府、银行等对保密要求极高的领域均已采用链路层加密技术。端到端加密则有所不同。它是先对电信号进行加密，再将其转换为光信号进行传输，接收方收到光信号后，先将其转换回电信号，再进行解密<sup>[8]</sup>。这种方法在传输过程中不需要过多关注中间环节的密钥，适合应用在需要经过多个节点的通信场景。

#### 3.2.2 光信号监测与篡改检测技术

安装光信号监测系统，实时检测光信号的功率、波长、相位等。一旦发现信号出现突发异常变化，判断是否存在他人窃听或篡改信息的情况。同时，采用光信号指纹识别技术，为每一路信号生成唯一的指纹。接收端在接收到信号后，首

先核对指纹，指纹不匹配代表信号被篡改，立即停止接收，以防止虚假信息混入。

### 3.3 数据传输与存储安全技术

光纤通信主要用在数据传输领域，所以必须要具有高速、稳定的传输性能，同时保障数据安全。安全防护工作应贯穿数据从开始传输直至存储完成后的全过程，其核心在于确保数据不泄露、不被篡改且随时可用。

其一，数据传输过程中需进行加密处理。不仅要对本号本身加密，还应对数据采用多种方式进行多层加密。例如，可运用对称加密或非对称加密对数据进行加密，即使数据在传输途中被截取，截取者也无法解读数据内容。而数据需要跨网络、跨地区传输时，可以采用 VPN 技术，借助光纤带宽大的优势搭建一条加密的“专属通道”，将其与外部网络隔离开来，从而提升数据传输的安全性。

其二，需验证数据是否被篡改。例如，可运用哈希算法（如 SHA - 256）为传输的数据计算一个“验证码”，接收方也重新计算该“验证码”并进行比对。当比对结果不一致时，代表数据在传输中途被篡改，需要立即要求重新传输，以确保数据的完整性。此外，还可采用数字签名技术，由发送方对数据进行签名，接收方验证该签名，这样即可以避免数据被伪造、篡改，又能确认发送方身份的真实性<sup>[9]</sup>。

其三，数据存储时也需要做好安全防护。光纤网络中存储的数据，如中继节点或核心设备中的数据，必须要加密存储。当设备被盗或遭受黑客攻击，也不会发生数据泄露风险。同时，应部署备份系统，定期对核心数据进行备份，最好将备份数据存储于不同地点。当发生天灾或设备故障，数据也不会丢失，可以随时恢复。此外，还应做好权限管理工作，为不同人员分配不同的访问权限，防止有人随意查看、篡改其无权访问的数据。

### 3.4 网络架构安全优化技术

良好的网络架构可以增强光纤通信的抗攻击能力，降低安全风险。具体而言，主要有以下几种举措：

其一，做好备份设计。例如，采用两条线路、两套设备，为重要的通信线路及核心设备均准备备用方案。当主线路或主设备出现故障时，系统能够立即切换至备用部分，确保通信不中断，避免因一处损坏而致使整个网络瘫痪。

其二，对网络进行分区隔离。根据业务类型和数据的敏感程度，将整个通信网络划分为不同的安全区域，如核心区、业务区和接入区。运用防火墙、隔离设备将这些区域分隔开，对相互访问进行控制。这样即使某个区域被攻破，攻击也不会蔓延至整个网络。针对特别敏感的数据，还可以采用专门的线路进行传输，不与普通业务混合，以提升安全性。

其三，强化路由安全。选择安全程度更高的路由协议，

例如具备防篡改功能、带有安全认证的 OSPFv3 或 BGP 扩展版，防止路由被欺骗或劫持。同时，设置路由监控系统，实时监测路由信息是否存在异常变化，及时发现问题情况，阻止非法路由接入。合理规划数据传输路径，减少中转次数，也能够使数据传输更加稳定、安全<sup>[10]</sup>。

其四，部署入侵检测和防御系统。利用专门的 IDS 和 IPS 设备实时监测网络流量和数据传输行为，识别端口扫描、数据篡改、非法接入等恶意攻击，及时报警并进行拦截。再结合大数据和人工智能技术，对异常行为进行分析和预测，使网络能够更主动地进行防御，提前抵御可能出现的安全威胁。

## 4 结语

光纤通信技术的核心在于使信息借助光在光纤中实现高速传输。本文对其工作原理、常见类型以及优缺点进行了分析，并且探究了电子通信安全的保护策略。所以，从光纤线路、光信号、数据存储传输以及网络结构等方面，构建了一套全面的安全保护方案。各项技术协同配合，能够有效防范各类安全风险，增强整个通信网络的安全性。保障物理线路安全是基础，对光信号进行加密与监控是核心，确保数据安全是关键，优化网络结构则是支撑。只有各个环节落实到位，才可以确保光纤通信安全且稳定地运行。

## 参考文献

- [1] 谢丽君,彭建军.基于光纤通信的车载电子通信安全技术分析[J].数字技术与应用,2024,42(10):51-53.
- [2] 仲伟.光纤通信技术在基层电子信息工程中的应用[J].移动信息,2025,47(8):481-483.
- [3] 王梦琪.工程电子信息中光纤通信高速率传输技术探索[J].漫科学(科技应用),2025(6):25-27.
- [4] 王慧龙,吴新.基于光纤通信技术的车载电子通信安全技术[J].通信电源技术,2023,40(2):155-157+161.
- [5] 史慧玲.基于光纤通信技术的车载电子通信安全技术研究[J].移动信息,2023,45(8):28-30.
- [6] 欧阳李亮,陈白昀.基于光纤通信技术的车载电子通信安全技术研究分析[J].通信电源技术,2022,39(2):151-153.
- [7] 裴雅,李亚珂.数据加密技术在计算机网络通信安全中的应用探究[J].信息记录材料,2025,26(4):87-89.
- [8] 黄秋艳,夏靖,王号,孟凡森,宋海涛.光缆线路故障告警技术在光纤通信工程中的应用[J].移动信息,2025,47(5):81-83.
- [9] 索国杰,王宇雁.量子密钥分发的光纤通信安全技术研究[J].高科技与产业化,2024,30(8):34-35.
- [10] 彭晓黎.基于光纤通信技术的车载电子通信安全技术[J].电子技术与软件工程,2019(3):19-19.

# Full-Scenario Coverage and High-Performance Support: Practical Solutions for Smart Campus Challenges through All-Optical Wireless Networks

Fei Xue

Dalian Maple Leaf Vocational and Technical College, Dalian, Liaoning, 116000, China

## Abstract

The deepening digital transformation of education has posed new challenges to campus network capacity and service quality. Traditional campus networks often struggle with dual demands for comprehensive coverage and high-performance support, revealing issues like weak coverage, insufficient bandwidth, complex management, and security vulnerabilities—critical bottlenecks hindering smart campus development. This study examines the network upgrade practices at Dalian Maple Leaf Vocational and Technical College, analyzing how all-optical wireless network technology innovatively addresses these challenges. Research demonstrates that adopting technical solutions such as all-optical indoor architecture, hybrid optical-electrical cable power supply, and centralized intelligent management enables seamless coverage across teaching, office, and dormitory scenarios while ensuring stable network performance under high-concurrency conditions. This practice provides replicable technical paradigms for similar institutions and offers theoretical references and practical insights for smart campus infrastructure development.

## Keywords

All-optical wireless network; Smart campus; Network experience; Full-scenario coverage; Digital transformation of education

## 全场景覆盖与高体验承载：全光无线网破解智慧校园困局的实践路径

薛飞

大连枫叶职业技术学院，中国·辽宁 大连 116000

## 摘要

教育数字化转型的深入推进，对校园网的承载能力与服务质量提出了全新挑战。传统校园网络在应对全场景覆盖与高体验承载的双重需求时，普遍暴露出覆盖薄弱、带宽不足、管理复杂、安全存患等问题，成为制约智慧校园建设的瓶颈。本文以大连枫叶职业技术学院的网络升级实践为研究对象，分析全光无线网技术在破解上述困局中的创新应用。研究表明，通过采用全光入室架构、光电混合缆供电、集中式智能管控等技术路径，可实现教学、办公、宿舍等全场景的无缝覆盖，并在高并发条件下保障网络体验的稳定流畅。该实践为同类院校的网络升级提供了可复制的技术范式，也为智慧校园的基础设施建设提供了理论参考与实践启示。

## 关键词

全光无线网；智慧校园；网络体验；全场景覆盖；教育数字化转型

## 1 引言

当前，教育数字化正从“工具赋能”迈向“生态重构”的新阶段。《中国教育现代化 2035》明确提出，要加快信息化时代教育变革，建设智能化、泛在化、个性化的智慧学习环境<sup>[1]</sup>。在这一进程中，校园网络作为数字校园的“神经网络”，其性能与质量直接决定着智慧应用的落地效果与用户体验。

然而，随着在线教学、高清视频会议、VR/AR 实训、物联网感知等新应用的普及，传统校园网络的局限性日益凸显。一方面，无线信号覆盖存在盲区，教室、宿舍、图书馆等关键区域时常出现“信号满格却无法上网”的尴尬；另一方面，老旧设备难以支撑高并发场景下的带宽需求，视频卡顿、登录缓慢、掉线频繁等问题严重影响了教学秩序与师生体验。更棘手的是，网络架构的僵化导致扩容困难、运维复杂，私接路由、安全漏洞等管理难题长期难以根治。

面对上述困境，如何构建一张既能覆盖全场景、又能保障高体验的新型校园网，成为众多院校亟需破解的课题<sup>[2]</sup>。大连枫叶职业技术学院的网络升级实践，为这一问题的解决

【作者简介】薛飞（1987-），男，中国辽宁大连人，本科，讲师，从事网络安全、信息化应用，AI赋能改革研究。

提供了有益探索。该校以大黑石校区为试点，引入全光无线网络架构，成功实现了网络性能的跨越式提升与运维管理的智能化转型。本文通过剖析其技术路径与实践成效，试图揭示全光无线网在破解智慧校园网络困局中的内在逻辑与普适价值。

## 2 传统校园网络的困局：全场景与高体验的失衡

智慧校园对网络的需求呈现出鲜明的二元特征：在空间维度上，要求实现教学区、办公区、生活区、室外区等全场景的无缝覆盖；在性能维度上，则需满足高并发、低时延、大带宽的高体验承载。然而，传统校园网络受限于技术架构与建设模式，在这两者之间长期处于失衡状态。

### 2.1 覆盖弱：信号盲区与体验洼地

高校校园建筑类型多样，教室、宿舍、图书馆等场景的结构复杂、墙体密集，对无线信号的穿透力构成严峻考验<sup>[3]</sup>。传统网络多采用放装式 AP 部署，信号在穿过承重墙、楼层板后大幅衰减，导致大量区域成为覆盖盲区或弱区。学生宿舍尤为典型——房间密集、终端众多，信号相互干扰严重，学生为改善上网体验而私接路由器，又进一步加剧了信道拥堵与线路杂乱。有调查显示，晚间的网络投诉高峰时段，宿舍区域的“视频加载慢、游戏延迟高”是最集中的槽点。

### 2.2 带宽窄：设备老化与性能瓶颈

随着 4K/8K 视频、云桌面、远程实训等高带宽应用的普及，校园网的流量压力呈指数级增长。但许多院校的网络设备服役年限较长，仍停留在百兆或千兆级别，难以支撑新兴业务的需求。教室场景中，教师播放教学视频时出现缓冲条、学生扫码签到时等待数秒，根源都在于带宽不足。尤其是在晚间的用网高峰时段，并发流量激增，网络时延波动剧烈，师生的用网体验急剧下滑。

### 2.3 管理难：安全隐患与运维压力

传统网络采用有线无线分离的建设模式，导致认证体系割裂、管理界面分散。有线网络缺乏有效管控，私接路由、非法接入等行为难以追溯；无线网络仅做基础认证，安全防护能力薄弱。与此同时，网络故障的定位与修复高度依赖人工经验，“用户报修—现场排查—逐段测试”的流程往往耗时数小时，运维效率低下。有院校统计，网络故障的平均修复时间（MTTR）长达 2 小时以上，师生满意度深受影响。

上述问题的深层根源，在于传统网络架构与智慧校园发展需求之间的结构性错配。当网络从“辅助工具”上升为“教学底座”时，其建设逻辑必须从“满足接入”转向“保障体验”，而这一转变的实现，有赖于技术架构的根本性革新。

## 3 破局之道：全光无线网的技术架构与创新路径

全光无线网并非光纤与无线的简单叠加，而是以光通

信技术为基座、以智能管控为中枢的系统性重构<sup>[4]</sup>。大连枫叶职业技术学院所采用的全光无线星空解决方案，集中体现了这一技术范式的核心特征。

### 3.1 全光入室：重构覆盖逻辑

传统网络的覆盖逻辑是“面状覆盖”——通过 AP 的广域发射试图覆盖一片区域，其结果往往是边缘信号衰减、相邻信道干扰。全光无线网则转向“点状覆盖”，将光纤延伸至每个房间，在每个教室、办公室、宿舍内部部署独立的 AP 终端。

这一重构的核心技术支撑是波分复用与无源光网络。在教室场景中，每间教室的 AP 通过波分复用技术上行，实现独享带宽直达核心交换机，彻底消除了传统汇聚链路的带宽争用问题。宿舍区域则采用分布式接入方案，实现“千兆到床头”，信号无死角且相邻房间互不干扰<sup>[5]</sup>。这种“一室一纤”的架构，既保证了每个空间单元的网络独立性，又通过集中式 OLT 实现了统一管控，实现了覆盖质量与管理效率的双重提升。

### 3.2 光电混合缆：破解供电难题

老旧楼宇的网络改造往往受制于强电布线——重新铺设电源线路不仅成本高昂，还涉及建筑安全与施工许可等复杂问题。全光无线网采用光电混合缆技术，在一根线缆中同时传输电力与数据，实现了超过百米的长距离 PoF 供电。

这一创新带来了多重效益：其一，无需改造本地强电线路，大幅降低了施工难度与改造成本；其二，集中供电避免了因单个房间断电导致的网络中断，提升了系统的可靠性；其三，供电与信号传输的一体化设计，简化了末端设备的安装维护，真正实现了“即插即用”。

### 3.3 智能管控：从被动响应到主动优化

体验的保障不仅依赖于硬件的性能，更有赖于软件的智能。全光无线网构建了“终端—网络—应用”三层联动的智能运维体系。

在终端层面，统一认证计费平台实现了有线无线一体化认证与跨校区无缝漫游，师生在教学楼、图书馆、宿舍之间移动时，网络连接无感知切换，应用体验不中断<sup>[6]</sup>。在网络层面，智能运维系统基于 AI 算法实时分析流量特征与信道质量，动态调整频段负载与 QoS 策略，在高并发场景下保障关键业务的带宽资源。在应用层面，运维平台可将故障定位时间从“小时级”缩短至“分钟级”，并自动推送处理建议，大幅提升了管理效率。

## 4 实践验证：大连枫叶职业技术学院的案例剖析

大连枫叶职业技术学院的网络升级项目，是全光无线网技术路径在职业教育领域的一次完整落地。该校大黑石校区承载近万名师生，涵盖教学楼、办公楼、图书馆、宿舍、食堂等多种场景，其网络改造的复杂性与代表性兼具。

#### 4.1 实施要点

项目在实施过程中采取了分场景精准施策的策略。教学区域部署高密度封装型 AP，满足互动教学、高清视频等高并发需求；办公区域采用场景化智分 AP 与光面板 AP 的组合，兼顾无线覆盖与有线接入；宿舍区域则通过分布式接入实现信号的全覆盖与带宽的独享。在核心层，部署高性能交换机集群，为教务管理、一卡通、安防等核心业务提供稳定支撑。

供电方案的创新是项目的亮点之一。老旧办公楼宇的改造中，光电混合缆的应用既解决了强电布线难题，又保障了无线性能的充分释放。楼宇弱电间采用无源透明汇聚设备，简化了部署、提升了可靠性。

#### 4.2 成效评估

改造后的网络性能实现了跨越式提升。实测数据显示，无线网络平均时延较改造前降低超过 70%，下载体验提升数倍<sup>[7]</sup>。师生的直观反馈是“快”和“稳”——网页打开迅速、视频播放流畅、在线教学无卡顿，曾经的高并发拥堵问题得到根本性缓解。

运维管理的智能化转型同样成效显著。统一平台实现了所有网络设备的可视可管，故障可精准定位到端口和用户，运维人员压力减轻近半。有线无线一体化的实名认证，有效规范了网络使用行为，私接路由现象大幅减少，安全隐患从源头上得到消除。

#### 4.3 经验启示

该案例的成功，为同类院校提供了三点重要启示。其一，网络升级应立足长远，选择具备演进能力的架构。全光网络的大带宽、易扩展、长寿命特性，可满足未来 5 至 10 年的发展需求，避免重复投资。其二，全场景覆盖与高体验承载并非不可兼得，关键在于技术路径的精准选择。光电混合缆、波分复用、智能运维等创新技术的组合应用，打破了传统网络的性能天花板。其三，校企合作是推进数字化基建的有效模式。通过引入成熟的技术方案与实施经验，院校可大幅降低试错成本、缩短建设周期。

### 5 迈向智慧校园的网络基座

全光无线网的价值，不止于解决当下的网络痛点，更在于为智慧校园的未来演进奠定基础架构。随着 VR/AR 沉浸式教学、超清远程互动、物联网智慧管理等新应用的兴起，网络将承载更丰富的业务类型、更严苛的性能要求。全光网络的高带宽、低时延特性，为这些应用准备了“即插即用”的承载平台<sup>[8]</sup>。无源汇聚的极简架构，则为未来网络向 Wi-Fi 7、50G PON 等新技术的平滑升级预留了空间。

与此同时，全光无线网的建设逻辑也为教育数字化的深入推进提供了方法论的启示。技术创新的价值，最终要落脚于用户体验的改善与教学质量的提升。大连枫叶职业技术学院的实践表明，当网络真正实现“无感存在、有感体验”时，师生对数字教学的接受度与参与度将显著提升，信息技术与教育教学的融合创新也因此获得更坚实的支撑。

展望未来，随着人工智能、大数据等技术与全光网络的深度融合，校园网将从“连接管道”升级为“智能底座”。届时，网络将不仅能感知业务需求、主动优化资源配置，更能通过数据分析反哺教学决策、赋能个性化学习。在这个意义上，大连枫叶职业技术学院的网络升级实践，既是解决当下困局的破局之举，更是通往未来智慧校园的奠基之路。

展望未来，随着人工智能、大数据等技术与全光网络的深度融合，校园网将从“连接管道”升级为“智能底座”。届时，网络将不仅能感知业务需求、主动优化资源配置，更能通过数据分析反哺教学决策、赋能个性化学习。在这个意义上，大连枫叶职业技术学院的网络升级实践，既是解决当下困局的破局之举，更是通往未来智慧校园的奠基之路。

### 6 结语

从“卡顿掉线”到“流畅稳定”，从“分散管理”到“智能管控”，大连枫叶职业技术学院以一张全光无线网破解了全场景覆盖与高体验承载的二元困局。这一实践不仅验证了全光技术架构在校园场景中的适用性与优越性，更为教育数字化转型背景下的校园网建设提供了可资借鉴的范式。当网络真正成为支撑教学、服务师生、赋能创新的坚实基座时，智慧校园的美好愿景将离我们更近一步。

#### 参考文献

- [1] 湖北大学大数据中心. 湖北大学与华为合作打造业界首个超万兆全光校园网络[N]. 湖北大学新闻网, 2025-03-27.
- [2] 华为技术有限公司. 华为Agile Mobile: 重构无线校园网络的技术范式与实践路径[EB/OL]. 百度开发者中心, 2025-12-06.
- [3] 朱虹, 张胜奎. 黑龙江联通助力打造智慧校园数字基建标杆[N]. 科技日报, 2026-01-27.
- [4] 肖明, 谭凤霞, 舒江波, 等. 基于校园大数据的无线网络AP布局优化[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(3): 384-390.
- [5] 安徽交通职业技术学院. 驭光而行 数智启新: 学院成功举办F5G-A全光校园研学会[EB/OL]. 2025-07-25.
- [6] 华为技术有限公司. 华为发布F5G-A万兆全光园区解决方案[EB/OL]. DoNews, 2025-09-18.
- [7] 汪淼. 华为打造全球首个大规模F5G-A智慧校园: 湖北大学率先落地[EB/OL]. IT之家, 2025-07-04.
- [8] 保定理工学院信息技术中心. 新兴网络与传统校园网架构融合方案[EB/OL]. 2024-08-20.

# Reliability and Verification System of Embedded Computing Hardware Solutions in Industrial Scenarios

Laiyou Liu

Shenzhen Jiexingtong Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518107, China

## Abstract

In the context of the deep integration of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, industrial grade embedded computing hardware, as a key infrastructure, needs to achieve long-term stable operation in complex electrical environments and harsh working conditions. Its reliability design has become a core challenge that restricts the development of the industry. This article focuses on the multidimensional requirements of industrial scenarios for computing performance, real-time performance, security, and environmental adaptability. The system proposes a reliability assurance system that covers hardware architecture design, software fault tolerance enhancement, full lifecycle verification, and supply chain risk management. By constructing a three in one framework of "design verification management" and combining verification methods such as functional simulation, accelerated life testing, and electromagnetic compatibility analysis, a reusable industrial grade embedded hardware development paradigm has been formed, providing theoretical support and practical reference for the independent research and development of highly reliable industrial equipment.

## Keywords

Industrial grade embedded computing; Hardware reliability; Verification system; System architecture design; Whole life cycle management

## 嵌入式计算硬件方案工业场景下的可靠性与验证体系

刘来友

深圳市杰星通科技有限公司, 中国·广东 深圳 518107

## 摘要

在工业4.0与智能制造深度融合的背景下, 工业级嵌入式计算硬件作为关键基础设施, 需在复杂电气环境与严苛工况下实现长周期稳定运行, 其可靠性设计已成为制约行业发展的核心挑战。本文聚焦工业场景对计算性能、实时性、安全性及环境适应性的多维度需求, 系统提出覆盖硬件架构设计、软件容错增强、全生命周期验证及供应链风险管理的可靠性保障体系。通过构建“设计-验证-管理”三位一体框架, 结合功能仿真、加速寿命测试、电磁兼容分析等验证方法, 形成了一套可复用的工业级嵌入式硬件开发范式, 为高可靠工业装备的自主化研发提供理论支撑与实践参考。

## 关键词

工业级嵌入式计算; 硬件可靠性; 验证体系; 系统架构设计; 全生命周期管理

## 1 引言

在工业自动化与智能化加速演进的当下, 工业级嵌入式计算硬件作为连接物理世界与数字系统的核心载体, 其可靠性直接决定了工业装备的运行效能与安全等级。相较于消费电子设备, 工业场景对硬件系统提出了更为严苛的要求: 需在 $-40^{\circ}\text{C}$ ~ $85^{\circ}\text{C}$ 宽温范围、强电磁干及高频振动等极端条件下, 实现微秒级实时响应、99.999%以上可用性及功能安全认证合规。然而现有研究多聚焦于单一技术维度优化, 缺乏对硬件架构设计、软件容错机制、全生命周期验证及供应链管理的系统性整合。本文针对上述挑战, 提出一种

覆盖“需求分析-设计实现-验证测试-生产维护”全流程的工业级嵌入式硬件可靠性保障体系, 通过多学科交叉方法与工程实践结合, 为轨道交通、能源电力等关键领域的高可靠硬件开发提供理论框架与技术路径。

## 2 工业级嵌入式计算硬件架构设计

工业级嵌入式计算硬件架构设计需在性能、功耗、可靠性及成本之间实现多目标优化, 其核心在于通过系统级权衡与模块化设计, 满足工业场景对实时性、环境适应性和长生命周期的严苛要求。

### 2.1 系统级设计权衡

工业场景的多样性决定了硬件架构需具备高度可配置性。例如轨道交通信号控制需满足 SIL4 安全等级, 需采用双冗余处理器架构; 而能源电力监测设备则更注重低功耗与宽温运行能力<sup>[1]</sup>。设计初期需通过需求分析矩阵明确计

【作者简介】刘来友(1975-), 男, 中国江西吉安人, 从事工业级嵌入式计算与定制化硬件方案领域研究。

算性能、实时性、功耗、成本及安全性的优先级。在处理器选型方面，MCU 适用于低功耗控制场景，SoC 可支持异构计算，FPGA 则用于高速信号处理。总线架构需根据数据带宽需求选择：低速外设采用 PC/SPI，高速存储接口选用 DDR4/LPDDR5，实时控制总线优先选择 EtherCAT 或 PROFINET。此外，电源架构设计需兼顾效率与动态响应，例如采用多相 DC-DC 转换器降低瞬态压降，并通过 LDO 为敏感模拟电路提供低噪声供电。

## 2.2 关键硬件模块设计

存储体系是影响系统可靠性的关键因素。工业级 Flash 需支持 -40℃~105℃宽温工作，并通过 ECC 校验实现单比特错误纠正。DDR 存储器需采用多通道交错访问设计，结合 PLL 锁相环优化时钟抖动，确保高速信号完整性。对于高速数字电路，需通过 HyperLynx 等工具进行 SI/PI 仿真，重点解决差分阻抗匹配、串扰抑制及电源完整性优化。例如在 10Gbps SerDes 接口设计中，需通过预加重与均衡补偿信道损耗。抗恶劣环境设计方面，需选用 AEC-Q200 认证的被动器件，并通过三防涂覆提升防潮防腐能力。对于振动场景，需采用金属化安装孔与减震橡胶垫降低机械应力，并通过有限元分析优化 PCB 叠层结构。

## 2.3 可制造性与可测试性设计

可制造性设计需从 PCB 布局阶段融入工艺约束。如 BGA 器件焊盘需满足 IPC-7351 标准，0402 封装电阻的间距应大于 0.2mm 以避免连锡。为提升生产良率，需在关键信号层设置测试点，并通过 JTAG 边界扫描实现芯片级功能测试。可测试性设计需覆盖从器件到系统的全链条：在 MCU 内部集成硬件看门狗与 CRC 校验模块，通过 PC 接口外接温度传感器实现板级健康监测。对于高速总线，需设计 PRBS 发生器与误码检测器，支持眼图分析与抖动测试。

# 3 嵌入式计算平台软件与可靠性增强

工业级嵌入式计算平台的软件设计需兼顾实时性、功能安全与长期稳定性，其核心在于通过全链路开发流程优化、通信协议栈可靠性实现及系统级容错机制构建，形成覆盖软件全生命周期的可靠性保障体系。

## 3.1 底层软件全链路开发

底层软件作为硬件与上层应用的桥梁，需实现从引导加载到实时操作系统的完整功能链。Bootloader 需支持多启动模式，并通过 CRC 校验与数字签名确保固件完整性。例如 U-Boot 可扩展为支持双镜像备份，主镜像故障时自动切换至备用镜像，切换时间需控制在 10ms 以内以满足 IEC 61508 SIL3 级要求。RTOS 选型需综合考虑任务调度效率与确定性，VxWorks 因其微秒级中断响应与优先级继承机制广泛应用于轨道交通控制，而 FreeRTOS 凭借轻量化设计更适合资源受限的传感器节点<sup>[2]</sup>。任务划分需遵循“单一功能原则”，将实时控制任务与数据采集任务分离，并通过邮箱或消息队列实现低耦合通信。内存管理需禁用动态分配，采用

静态内存池与内存保护单元防止堆栈溢出，例如通过 ARM Cortex-M 的 MPU 配置实现任务级内存隔离。

## 3.2 工业通信协议栈实现

工业通信协议栈的可靠性直接影响系统互联能力。以 EtherCAT 为例，其分布式时钟同步机制可实现 μs 级同步精度，但需在从站设备中实现精确的本地时钟补偿算法。协议栈开发需遵循 IEC 61158 标准，通过状态机管理协议生命周期，并在数据链路层集成 CRC-16 校验与自动重传机制。对于 PROFINET IO，需实现实时通道与等时同步实时通道的双模式支持，其中 IRT 需通过时间触发以太网实现确定性传输。在软件实现层面，可采用分层架构：物理层驱动通过 DMA 加速数据收发，数据链路层实现帧封装/解封装，应用层通过回调函数向上层传递有效数据。例如，在 Modbus TCP 协议栈中，需在 TCP/IP 协议栈与 Modbus 应用层之间插入看门狗定时器，防止因网络阻塞导致协议栈死锁。此外，需通过 Wireshark 抓包分析验证协议交互时序，确保符合 IEC 61784 规范。

## 3.3 系统级容错与安全机制

系统级容错需从硬件抽象层到应用层构建多级防御体系。在硬件故障检测方面，可通过 ADC 周期性采样电源电压与温度传感器数据，结合阈值比较与滑动窗口算法识别异常。对于处理器故障，需实现双核锁步或看门狗管理器，例如 TI Hercules 系列 MCU 通过内置比较器实时监测两核运算结果一致性。软件容错方面，可采用 N-版本编程实现关键算法冗余，如通过三模冗余投票机制提高传感器数据可信度。安全机制需覆盖功能安全与信息安全：功能安全通过 IEC 61508 认证的 Safety Library 实现安全输入/输出处理，信息安全则需集成 AES-128 加密与 TLS 1.3 协议栈，防止数据篡改与中间人攻击。例如在轨道交通信号系统中，需同时满足 SIL4 级功能安全与 IEC 62443 信息安全标准，通过安全启动与安全存储构建信任链，并通过定期安全审计消除潜在漏洞。

# 4 定制化硬件方案的验证体系构建

工业级嵌入式硬件的定制化开发需构建覆盖全生命周期的验证体系，以确保其在极端工况下的长期可靠性。该体系需融合功能验证、环境适应性测试、寿命评估及供应链风险管理，形成“设计-验证-生产”闭环。

## 4.1 功能验证与仿真测试

功能验证是硬件设计的首要环节，需通过虚拟仿真与物理测试结合实现全链路覆盖。在数字电路设计阶段，采用 ModelSim 进行 RTL 级功能仿真，验证逻辑正确性；通过 VCS 或 QuestaSim 实现门级仿真，检查时序约束是否满足设计要求<sup>[3]</sup>。对于高速信号，需利用 HyperLynx 或 ADS 进行信号完整性仿真，优化阻抗匹配、串扰抑制及眼图质量。模拟电路验证需通过 Cadence Virtuoso 进行 SPICE 仿真，重点分析电源完整性噪声、ADC 线性度及运放增益带

宽积。硬件描述语言验证需构建 UVM 测试平台,通过随机约束生成覆盖所有边界条件的测试向量,确保功能覆盖率达 100%。物理原型验证阶段,需开发 FPGA 原型系统或硬件仿真器,通过实际 I/O 接口与外设交互,验证硬件-软件协同性能。例如在轨道交通控制器开发中,需通过 CANoe 模拟列车网络通信,验证 EtherCAT 从站同步精度是否满足  $\mu\text{s}$  级要求。

#### 4.2 环境可靠性测试

环境适应性测试需模拟工业场景的极端条件,包括温度循环、振动冲击、电磁兼容及防护等级验证。温度测试需覆盖  $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $85^{\circ}\text{C}$  宽温范围,采用步进应力法确定器件失效阈值,并通过 HALT 快速暴露设计薄弱点。例如对 BGA 封装器件进行  $-55^{\circ}\text{C}$  ~  $125^{\circ}\text{C}$  热冲击测试,验证焊点可靠性。振动测试需根据 IEC 60068-2-64 标准执行随机振动与正弦扫描,通过应变片监测 PCB 应力分布,优化器件布局与减震设计。EMC 测试需满足 IEC 61000-4 系列标准,包括 ESD、EFT 测试,通过磁环、TVS 二极管及屏蔽罩提升抗干扰能力。防护等级验证需按 IP67 标准进行 1m 水深浸泡试验与粉尘箱测试,确保外壳密封性。

#### 4.3 老化与寿命评估

寿命评估需结合加速老化试验与实际工况建模,预测硬件在长期运行中的失效概率。对于半导体器件,采用 Arrhenius 模型与 Coffin-Manson 模型分别计算高温与振动导致的寿命损耗。例如电解电容需在  $105^{\circ}\text{C}$  下进行 1000h 加速老化试验,通过 ESR 变化推算实际工况下的 MTBF。对于 Flash 存储器,需通过 JEDEC JESD218 标准进行 P/E 循环测试与数据保持测试,验证其耐久性与数据保留能力。PCB 寿命评估需关注焊点疲劳,通过 Miner 线性累积损伤法则计算温度循环与振动共同作用下的损伤值。系统级寿命预测需构建蒙特卡洛仿真模型,输入器件失效率与应力参数,输出整机可靠性指标。

#### 4.4 供应链风险管理

供应链可靠性直接影响硬件的长期可维护性。需建立供应商评估体系,从质量体系、生产能力及交付周期三个维度评分,优先选择 AEC-Q200 认证的被动器件与车规级主动器件。对于关键器件,需实施“一主两备”策略,与至少两家供应商签订长期供货协议,并储备 6 个月安全库存。物料清单管理需通过 PLM 系统实现版本控制,防止因器件停产导致设计冻结。例如,在轨道交通信号系统开发中,需提前 3 年与芯片厂商锁定产能,并通过替代料验证降低断供风险。

### 5 工程化实施与全生命周期管理

工业级嵌入式系统的工程化实施需贯穿需求分析、设计开发、批量生产到长期运维的全生命周期,通过系统化管理能力、生产质量控制及持续技术支持实现可靠性闭环。

#### 5.1 系统管理能力

系统工程管理是确保多学科协同的核心手段,需基于

V 模型开发流程构建需求-设计-验证的映射关系。在需求分析阶段,通过 QFD 将用户功能需求转化为技术特性参数,例如将轨道交通控制器的“实时响应”需求转换为 RTOS 中断延迟  $\leq 5\mu\text{s}$  的量化指标。设计阶段需采用 MBSE 方法,通过 SysML 语言构建系统架构模型,明确硬件、软件及机械的接口定义与交互逻辑。验证阶段需执行多层次测试:模块级通过 JTAG/SWD 调试接口验证硬件功能,系统级通过 HIL 仿真测试 ECU 与传感器/执行器的协同性能,整车级通过实车路试验证电磁兼容性与环境适应性。

#### 5.2 批量生产导入与质量控制

生产导入需完成从工程样机到量产产品的工艺转化,重点解决可制造性与质量控制问题。工艺文件开发需明确 SMT 贴片温度曲线、波峰焊导轨速度及 AOI 检测阈值。产线建设需配置自动化设备:通过 SPI 设备控制锡膏印刷厚度,利用 X-Ray 检测 BGA 焊点空洞率,采用 ICT 验证电路通断。质量控制需实施 APQP 流程,在 PPAP 阶段提交 CPK 报告,并通过 SPC 监控产线波动。

#### 5.3 长期技术支持与优化

全生命周期管理需覆盖产品退役前的持续服务,包括故障修复、功能升级及备件供应。故障管理需建立 FRACAS,通过 FTA 定位根因,并通过 8D 报告推动设计改进。功能优化需响应市场需求,通过 OTA 技术实现软件远程升级,或通过硬件改版提升算力。备件管理需基于 Weibull 分布预测器件寿命,对电解电容、Flash 存储器等易损件建立安全库存,并通过替代料验证降低断供风险。需定期发布技术通告,向用户提供硬件维护指南及软件补丁。

### 6 结语

本文针对工业级嵌入式系统定制化开发需求,系统构建了涵盖功能验证、环境可靠性测试、老化寿命评估及供应链风险管理的硬件验证体系,提出了基于系统工程管理、批量生产质量控制与长期技术支持的全生命周期管理方案。通过 MBSE 方法实现需求-设计-验证的闭环追溯,采用 HALT 试验与 Weibull 分析提升硬件可靠性,结合 FRACAS 系统与 OTA 技术保障产品持续优化。未来研究可进一步融合数字孪生技术,实现硬件设计-生产-运维的虚拟映射与实时优化,同时探索 AI 驱动的失效预测模型,为工业互联网场景下的嵌入式系统开发提供更高效率的工程化解决方案。

#### 参考文献

- [1] Kamal R. Embedded Systems: Architecture, Programming and Design [M]. 陈曙晖,译.北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Noergarrd T. Embedded Systems Hardware and Software Architecture [M]. 北京:人民邮电出版社,2005.
- [3] Zhang H, Li X, Wang Y, et al. Digital Thread-Based Full Lifecycle Management Optimization for Smart Manufacturing Embedded Devices [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 4235-4246.

# Analysis of Key Technologies of Emergency Broadcasting in Smart Radio and Television Network

Yu Fan

The Culture, Sports, Radio, Television, and Tourism Center of the 87th Regiment, 5th Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Wenquan, Xinjiang, 833417, China

## Abstract

The Smart Broadcasting Network Emergency Broadcast is an intelligent, networked national emergency information dissemination system built upon wired and wireless broadcasting technologies and modern information communication systems. To address challenges such as delayed information release and imprecise coverage, it is essential to advance research on key technologies for this system, ensuring that warning information can be swiftly and accurately delivered to designated populations during emergencies like natural disasters or public safety incidents. This paper begins with an analysis of the network architecture of the Smart Broadcasting Network Emergency Broadcast, then elaborates on critical technologies—including precise targeted dissemination, intelligent collaborative scheduling, and big data analytics—to ensure reliable and controllable information flow from release to reception. The aim is to enhance the coverage and precision of emergency information delivery.

## Keywords

Smart Broadcasting Network; Emergency Broadcasting; Information Dissemination; Key Technologies

# 浅析智慧广电网络应急广播关键技术

范瑜

新疆生产建设兵团第五师八十七团文体广电旅游中心, 中国·新疆 温泉 833417

## 摘要

智慧广电网络应急广播是基于有线、无线广播电视与现代信息通信技术, 所构建起来的智能化、网络化国家应急信息发布体系, 加强智慧广电网络应急广播关键技术研究, 才能解决信息发布不及时、覆盖不精准等问题, 保障自然灾害、公共安全等突发事件发生时, 预警信息能快速精准传达至指定区域民众。文本尝试从智慧广电网络应急广播的网络架构入手, 对确保信息从发布到接收全链路可靠可控的精准靶向发布、智能协同调度、大数据分析等关键技术进行细致论述, 旨在提升应急信息覆盖与精准触达能力。

## 关键词

智慧广电网络; 应急广播; 信息传播; 关键技术

## 1 引言

在各类自然灾害和突发公共安全事件频发背景下, 社会公众对实时、精准和权威的应急信息需求日益迫切, 国家也高度重视应急管理体系建设, 通过利用智慧广电网络覆盖广和可信度高的优势, 提升应急信息传播能力<sup>[1]</sup>。然而, 将智慧广电网络转化为高效智能的应急广播系统, 需要攻克一系列核心技术难题, 比如怎样实现信息精准靶向发布、如何构建多源异构网络的智能协同与无缝切换机制等, 应对智慧广电网络在应急广播领域应用所必须突破的关键技术群进行系统探索与梳理, 以此构建一个广覆盖、高可靠、精准化和智能化的应急信息传播体系, 筑牢社会公共安全屏障。

【作者简介】范瑜(1974-), 男, 中国安徽砀山人, 本科, 中级职称, 从事智慧广电网络和应急广播研究。

## 2 智慧广电网络应急广播的网络架构

### 2.1 四级管理架构

在智慧广电网络应急广播体系中, 四级管理架构是一个自上而下、分级负责的智慧管理体系(见图1)。最一层是国家级平台, 可以说是体系的大脑和总枢纽, 主要负责接收国家预警信息发布中心的权威预警信息, 并进行国家级信息播发调度; 第二层是省级平台, 作为应急广播体系的关键执行中枢, 负责接收国家级平台或省级应急管理部的指令和信息, 并对全省范围内的应急广播资源进行统一管理、智能调度和精准播发控制; 第三层是市县级平台, 主要承担本地化执行与信息注入的任务, 可以结合本地实际情况对预警进行补充细化; 第四层是乡镇村级广播站, 直接负责最终接收终端的日常管理和信息落地, 确保指令能够精准触达每一位居民。

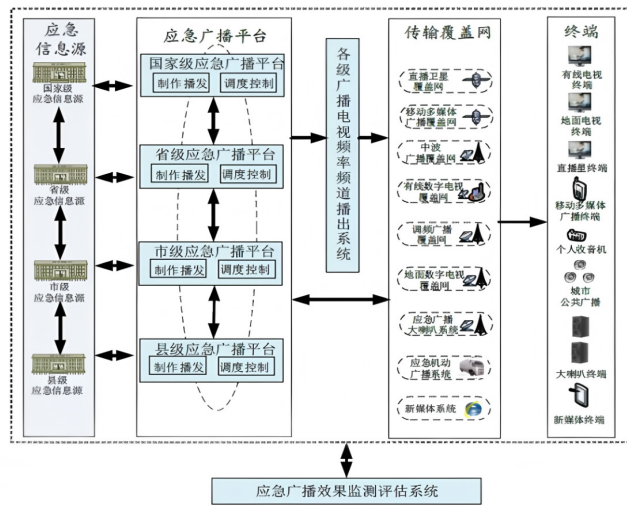


图1 智慧广电网络应急广播四级管理架构

## 2.2 四层逻辑架构

在智慧广电网络应急广播体系中，四层逻辑架构是从技术实现的角度，将整个系统自顶而下划分为功能清晰的四个层次。第一层是业务应用与智能决策层，作为整个系统的大脑，有效集成了管理软件、地理信息系统、可视化指挥中心等，主要负责应急信息研判、编排和发布决策制定；第二层是网络传输调度层，主要由有线电视网、地面数字电视、调频广播等多种传输通道融合而成，在发布应急信息时可根据实际需要选择最优路径执行；第三层是终端接收适配层，该层由机顶盒、户外大屏等各种智能终端所构成，负责接收指令和向社会公众播发信息；第四层是安全保障与运维管理层，通过对全网设备进行实时状态监测、故障预警和智能运维，确保信息源头可信和传输过程安全<sup>[2]</sup>。

## 3 智慧广电网络应急广播的关键技术

### 3.1 协议与标准一体化技术

在智慧广电网络应急广播这一复杂系统中，不仅涉及到国家级至村镇级的多级平台，而且包含了有线、无线等多种传输网络和终端设备，若某个环节采用了私有协议，就可能会出现语言不同的情况，对应急预警信息顺畅传递带来不利的影响。协议与标准一体化技术的有效应用，就能切实解决这一问题，其工作原理是通过制定全国统一技术规范体系，主要包括应急广播消息格式、传输协议、终端接口标准等内容，使之贯穿系统各个层次，确保指令传递的准确性和时效性。在实践中应用，可从国家层面入手发布一系列的标准文件，对平台生成、网络传输、终端解析等完整数据帧结构、信令流程和通信接口进行定义，促使不同厂商生产的平台设备、网络适配器、接收终端等均能够遵守同一套标准，实现无缝对接和协同工作。这项技术应用取得的核心效果就是实现了系统的互联互通，有效避免因为技术路线不一致引发的重复开发和集成困难问题，并且贯彻执行统一的标准协议，也能使发布指令可以最短路径和最小延迟准确送达目标。

### 3.2 基于 GIS 的精准靶向发布技术



图2 基于 GIS 的应急广播精准靶向发布

考虑到采取广而告之的应急信息播报方式，不但会给无关区域造成极大困扰，而且会受到信息过载影响，导致发布的关键指令不能真正聚焦面临风险的区域与群体，这是要解决这一问题，就可对基于 GIS 的精准靶向发布技术加以运用，通过将地理位置信息与应急广播业务深度融合起来，实现对应急预警信息的精准覆盖触达。这一技术的工作原理是将抽象的预警信息在电子地图上数字化为精确的多边形、线条或点状靶区（见图2），实践应用要有效整合基础地理底图、精细化行政区划、关键基础设施位置等多维度数据，并让每个应急广播终端都能在数据库中有效关联其物理安装位置的行政区划编码或 GPS 地理坐标，在发布预警时，平台的地理信息引擎就会自动进行空间计算，将靶区图形与终端坐标进行实时匹配，自动筛选出所有落在靶区图形范围内的终端，进而生成精准的应急预警信息播发列表。这项技术应用可以将预警信息的服务粒度从传统的区县级锐化到行政村、自然村、特定街区等级别，极大提升预警的针对性和有效性，也有效避免了社会资源的无谓消耗。

### 3.3 多网融合与智能协同调度技术

在严峻的自然灾害和突发事件面前，单一的通信网络难以满足不同场景和终端的全覆盖需求，并且可能会出现中

断的情况,这时就要采用多网融合与智能协同调度技术,通过聚合多种异构网络的传输能力,实现对应急预警信息的有效传递。该项技术的工作原理是在平台侧构建一个统一的网络资源管理与协同调度引擎,通过该引擎实现对有线数字电视网络、地面数字电视与调频广播网络、移动通信互联网等传输通道的有效管理,并对这些网络通断、负载、覆盖质量等情况进行实时监测,在发布应急预警指令时,调度引擎可依托内置的多目标优化决策算法,动态生成最优或组合式的应急信息播发策略,比如通过有线网对城镇固定用户进行高清晰度的视频插播、通过地面数字电视对广大农村及户外区域进行主要覆盖等<sup>[3]</sup>。实践应用时,要将注意力放在播发内容和目标区域上,依托协同调度引擎自动执行复杂的网络路由与协议适配工作,比如在发布突发特大洪涝灾害应急信息时,系统会自发优先启动尚未中断的卫星和地面无线广播进行广播预警,同时利用残余的蜂窝网络碎片化向重点区域人员发送详细指引信息。这项技术的应用,极大增强了整个应急广播系统的覆盖广度,确保在任何复杂网络环境下都至少有一条通路能将预警信息传达给受众。

### 3.4 智能终端唤醒与状态回传技术

要确保应急广播传达信息成功地触达终端,就要通过智能终端唤醒与状态回传技术,使单项的广播链路升级为双向可管可控可查的智能交互通道,保证应急广播信息得到有效传播和真正被听到。这项技术的工作原理是通过在终端内置融合接收芯片,实现对来自不同网络专属唤醒信令的有效监听,同时依托终端内置的4G/5G模块,构建一条稳定的信息回路,终端在接收到指令和完成播发过程后,可以自动生成包含自身ID、工作状态和接收结果的结构化数据包,并反向传输到管理平台。实践应用时,要将智能唤醒技术和状态回传技术有效联系起来,使管理人员在指挥中心大屏上能够看到发出的指令和明确是否接收到,若是出现故障问题,也能依赖双向通信模块将实际工作状态打包成数据报文,有效传递到管理平台进行针对性处理。这一技术应用实现了对海量终端应急预警信息播放效果的可视化和精准化监测,让被动应急广播变成一种主动、可管和可控的高效服务,极大提升了应急响应的速度与质量。

### 3.5 大数据智能分析技术

智慧广电网络应急广播运行会产生海量的数据信息,对这些数据信息进行简单存储管理,就难以发现其潜藏的价值,赋能应急广播体系持续优化改进,提升应急管理服务能力。在有效运用大数据智能分析技术以后,就可以将这些数据资源有效转化为决策智慧和运营能力,实际工作原理是基于多源数据汇聚融合,利用分布式计算、数据挖掘和机器学习算法,对这些数据进行关联分析、模式识别和趋势预测,最后通过可视化仪表盘赋能管理人员科学判断和系统自动调整,比如对历史同期气象数据与终端故障率的关联性进行分析,就能建立预期模型,为后续应急信息播发路径选择及优化提供有利参考<sup>[3-4]</sup>。实践应用时,大数据分析技术要

渗透到应急广播事前、事中和事后全生命周期当中,在事前预警阶段可基于历史数据,对特定区域的自然灾害发生规律进行有效分析,整个过程还可结合实时气象数据进行风险概率预测,从而更好辅助决策提前进行自然灾害防范宣传。在事中响应阶段,要将注意力放在终端回传和接收成功率上面,在有效判断薄弱区域信息覆盖情况的基础上,自动触发通过备用网络进行应急信息补充发布。在事后评估优化阶段,可以通过对应急事件全链路数据信息进行回溯性分析,客观评价从预警生成到信息触达各个环节的时效与效果,从而精准定位其中较为薄弱的环节与内容,为后续工作持续优化改进奠定良好的基础。这一技术的有效应用赋予了应急广播自我洞察、预测和优化的能力,特别是在基于实时数据展开关联性分析和量化评估每次应急事件发生响应效果后,都能不断驱动管理流程和终端覆盖的持续优化,切实提升应急管理的主动性和前瞻性。

### 3.6 安全认证与加密技术

要切实保障智慧广电网络应急广播体系运行安全、可靠和稳定,还需要对安全认证与加密技术进行应用,避免出现指令被恶意伪造或篡改的情况,也确保应急广播指令来源可靠、内容完整和传输机密。该项技术的工作原理主要基于非对称密码体系和数字证书基础设施,实践应用要将重心落在信源认证与完整性保护、传输链路加密等方面,前者是在平台侧使用由国家权威认证机构颁发的专用数字证书对应的私钥,实现对信息核心内容的数字签名,为信息盖上独一无二的电子公章。后者是对公共网络或无线空口传输的控制指令,采用高强度的对称加密算法进行保护,即便是数据信息被截获也无法准确解读。这一技术的应用有效杜绝了非法利用应急广播渠道的可能性,并且满足了国家对关键信息基础设施的等级保护与密码应用安全性评估的合规要求。

## 4 结语

智慧广电网络应急广播要想充分发挥其作为国家应急体系重要支柱的作用,就势必要做好技术融合这一核心工作,通过持续深化网络融合与智能调度、充分利用大数据与地理信息技术等,确保有线、无线、卫星和移动互联网传输通道在任何情况下都能协同互补,并推动预警发布从广泛覆盖向精准靶向传达演进。最终,使智慧广电网络应急广播真正成为一个能够覆盖全面、响应迅速和精准高效的现代化公共应急信息服务网络,深度嵌入到智慧城市建设和社会治理当中。

### 参考文献

- [1] 曾群惠.广电数字专网的技术架构优化与应用场景拓展研究[J].中国宽带,2026,22(01):96-98.
- [2] 李海洋.广电网络在应急广播体系建设中的应用与优化策略研究[J].广播电视网络,2025,32(11):69-71.
- [3] 周超.智慧广电网络应急广播关键技术研究[J].中国宽带,2025,21(03):161-163.

# Research on Identification Countermeasures of Database Privacy Data Leakage in Software Development

Yanhui Li

Shanghai Shanda College, Shanghai, 201209, China

## Abstract

As digital transformation continues to deepen, software databases contain increasingly extensive information. The leakage of personal data and critical information within these databases poses significant threats to individual rights. In this context, it is essential to establish comprehensive privacy data leakage identification and prevention strategies throughout the entire software development lifecycle. Effective application of technologies such as sensitive data auto-identification, abnormal access and operational behavior detection, data flow and transmission leakage analysis, and security vulnerability identification can enhance privacy data protection capabilities. Building on this foundation, implementing core control measures during critical phases—including development, testing, deployment, and operations—will strengthen the overall protection of privacy data.

## Keywords

software development; database; privacy data breach; identification and prevention

## 软件开发数据库隐私数据泄露识别对策研究

李彦会

上海杉达学院, 中国·上海 201209

## 摘要

在数字化转型持续深化的背景下, 软件数据库中囊括的信息变得越来越多, 数据库中的个人信息和重要数据一经泄露则很容易会对个人权益造成较大的影响和威胁。在这样的背景下立足软件开发全过程明确隐私数据泄露识别与防控策略是十分必要的。可通过敏感数据自动识别技术、异常访问与操作行为识别技术、数据流向与传输泄露识别技术、安全漏洞与脆弱性识别技术等相应技术的有效应用提高隐私数据泄露识别能力。在此基础之上紧抓开发阶段、测试阶段、上线部署阶段、运维阶段等各个阶段明确核心管控措施, 提高隐私数据的保护能力。

## 关键词

软件开发; 数据库; 隐私数据泄露; 识别与防范

## 1 引言

现阶段软件应用范围在不断扩大, 在政务、金融、医疗、民生等相应领域都有所应用。而在软件应用中数据库作为数据存储与管理的核心载体, 容纳了大量数据, 这其中也包含个人信息或关乎公共利益的重要数据, 一经泄露所带来的影响和损失是不容忽视的, 因此必须加强数据库隐私数据泄露识别, 做好隐私数据的保护, 可从如下几点着手提高隐私数据泄露识别能力。

## 2 数据库隐私数据泄露识别技术

### 2.1 敏感数据自动识别技术

想要更好的识别隐私数据泄露问题, 首要基础和重中

之重则是做好敏感数据的识别, 只有这样才可以为后续的监测与防护奠定良好的基础和保障。可根据《中华人民共和国个人信息保护法》将个人信息划分为一般个人信息和敏感个人信息, 敏感个人信息又包含宗教信仰、生物识别、特定身份、医疗健康、金融账户、行踪轨迹等等。针对该类隐私数据可采用结构化字段匹配、语义识别、规则引擎结合的方式进行数据库信息扫描完成公开数据、内部数据、敏感数据、核心机密数据的识别, 并生成统一的敏感数据资产清单, 提高敏感数据识别能力。此外, 为了更好的保障系统运行的流畅性, 可遵循最小必要原则标记与业务相关的隐私数据。

### 2.2 异常访问与操作行为识别技术

异常访问与操作行为识别技术可以及时的发现泄露风险, 其原理是通过数据库的全流程访问, 及时的识别违背正常策略的行为。在用户登录应用软件时该项技术可实时监测用户的身份、IP 地址、操作时间、SQL 语句类型、数据访问量、数据导出频次等相应的数据信息, 构建正常行为基

【作者简介】李彦会(1988-), 女, 中国广东深圳人, 硕士, 助教, 从事质量管理, 软件开发技术研究。

线，若用户的行为偏离基线则会自动预警。例如可以精准识别非工作时间批量查阅敏感数据、越权访问未授权表、高频次小批量导出数据、执行高危 SQL 语句、境外 IP 访问核心数据库等等。可通过日志采集、协议解析、行为分析模型的构建提高异常访问与操作行为的识别能力，及时发现异常行为，保障异常行为识别的准确性。

### 2.3 数据流向与传输泄露识别技术

在隐私数据泄露识别上需注意数据跨节点传输和流转是泄露的高发节点，因此必须抓住这一关键点进行流量监测和数据血缘追踪，确保隐私数据全链路可见、可控。可借助数据流向与传输识别技术精准识别数据流出行行为，有效监测敏感数据从生产库流向测试库、开发环境、外部系统、终端设备的全过程。若在检测的过程中发现未授权数据流转行为，可采用密码技术配合网络边界防护设备及时阻断违规流向，保障数据安全。

### 2.4 安全漏洞与脆弱性识别技术

在软件开发阶段很有可能会出现配置缺陷、代码漏洞等相应问题，这些问题也会导致隐私数据泄露。为更好的规避这类问题则需要借助安全漏洞与脆弱性识别技术，通过技术识别及时发现 SQL 注入漏洞、权限配置漏洞、加密实现缺陷、日志审计缺失、默认口令未修改等相应问题，保障隐私数据安全。在具体落实上可借助静态代码检测、动态安全测试、配置基线核查实现开发测试阶段的漏洞识别，生成漏洞清单，并为相关工作人员提供修复建议，严格按照国家标准要求进行漏洞审核，从源头上降低隐私数据泄露风险<sup>[1]</sup>。

不同技术的核心功能和识别对象是存在鲜明差异的，需结合隐私数据泄露识别需求来进行技术选择和技术应用，如表 1 所示。

表 1：数据库隐私数据泄露识别核心技术

技术维度	核心功能	识别对象
敏感数据识别	分类分级标记	隐私数据字段
异常行为识别	实时监测预警	违规访问操作
数据流向识别	全链路追踪	跨域数据传输
漏洞识别	脆弱点检测	代码配置缺陷

## 3 软件开发全流程隐私数据泄露管控对策

软件开发是一项系统性工作，需要根据不同阶段存在的数据泄露隐患针对性的落实管控工作，明确管控目标和核心管控措施，如表 2 所示。

表 2：不同阶段的管控目标及核心管控措施

流程阶段	核心管控目标	关键措施
开发阶段	源头风险防控	代码审核、数据隔离
测试阶段	测试数据安全	脱敏处理、权限管控
上线阶段	配置安全加固	权限最小化、加密审计
运维阶段	持续安全运行	实时监测、应急处置

### 3.1 开发阶段

开发阶段是隐私数据安全管控的重心，可以从源头上减少隐私数据泄露的问题。而在开发阶段相关工作人员首先需要从需求分析、架构设计、代码编写等各个环节出发，将安全要求嵌入到不同环节当中。例如在需求分析阶段需要通过数据分析整合明确应用软件在投入使用以后隐私数据的收集范围、使用目的、存储期限，坚持最小必要与知情同意原则，在满足软件应用的实际需求同时最大化的减少不必要或与业务无关的个人信息。而在架构设计阶段则可通过数据库敏感字段加密、访问权限隔离、数据脱敏规则的设计保护隐私数据。在代码编写阶段应严格按照相应规范要求来编写 SQL 语句，并且通过漏洞检测及时的发现问题，配合各种现代化技术的有效应用实现敏感数据访问日志自动记录，并禁止硬编码数据库凭证与敏感信息。还可通过代码安全审核机制的构建进行隐私风险核查，若核查未通过则不得进入下一环节<sup>[2]</sup>。

### 3.2 测试阶段

测试阶段是验证软件功能与安全性的关键环节，可以及时的发现隐私泄露风险，有效规避数据滥用、越权访问、违规留存、随意拷贝等相应行为。在该阶段需确保测试过程不触碰、不扩散、不遗留真实隐私数据，确保测试数据的生成与使用符合于规范要求，坚决杜绝在测试阶段，从生产库抽取未经处理的真实个人信息，用于压力测试、接口测试和功能测试。进入测试环境的敏感数据可通过标识化、加密、掩码替换等相应脱敏处理方法，在确保数据信息仍旧保留业务逻辑有效性的同时确保隐私数据处理后无法识别特定自然人。此外，在测试的过程中可通过访问控制机制的优化和调整确保测试人员仅可访问相关数据，禁止越权访问非相关数据库表、敏感字段及后台配置信息，避免在测试阶段出现数据泄露的情况。同时可借助区块链技术等相应现代化技术将测试操作等相应数据信息统一整合并进行审计。为确保测试工作落实的规范性、专业性，有效发现漏洞的同时避免隐私信息的丢失，可签订数据安全与保密协议，在协议中明确相关工作人员禁止私自拷贝、截图、传输、存储测试环境中的隐私数据，不可将隐私数据应用于测试以外的任何用途。在测试结束以后还需按照规范标准对临时文件、数据、日志、缓存信息等相应数据信息进行全面且彻底的清理，避免出现隐私数据残留的情况。此外，在测试的过程中还需同步落实数据安全专项监测，从敏感数据识别、访问控制、加密脱敏、异常阻断等安全机制出发，分析该类安全机制是否能够发挥其应有的作用和影响。若发现存在隐私数据泄露隐患应及时反馈给相关工作人员并落实整改工作，确保系统上线前其安全能力达标<sup>[3]</sup>。

### 3.3 上线部署阶段

上线部署阶段是软件系统从开发测试环境转向生产运

行环境的关键节点,在该阶段进行安全防控也是十分必要的,否则则很容易会出现配置疏漏、权限泛滥、加密失效、审计不全等相应问题,进而使隐私数据处于开放暴露的状态。而在上线部署阶段可通过强化安全基线、收紧访问权限、启动密码保护、完善审计机制等多种方式确保隐私数据安全。这就需要相关工作人员根据国家安全标准与数据安全法规的相关条例确定安全配置基线,做好身份鉴别、访问控制、协议配置、服务端口、日志记录等相应配置的调整,并且关闭不必要的存储过程、远程调用功能以及管理端口,同时需要消除宽松权限、默认账号、弱口令等潜在的安全隐患。在生产库权限配置的过程中需要遵循最小权限原则,即根据不同岗位工作人员的工作内容、工作职责来确定授权权限,可以根据软件应用对象将其划分为运维、管理、业务、开发等不同人员群体,然后针对性的确定系统权限。对于敏感数据则可以采用加密储存机制,结合国家密码管理要求确定加密算法,确保隐私数据在静止状态下并不会被明文读取。配合数据库审计功能有效识别、监测登录行为、查询操作、修改操作、删除操作、批量导出操作等相应的操作信息,将信息登记并共享至云端平台。在上线前还需要通过安全评估和配置核查,分析隐私数据防护措施是否到位,是否建立了漏洞闭环管理机制,权限设置是否合理等等,坚决杜绝未经过安全核查即上线运行<sup>[4]</sup>。

### 3.4 运维阶段

数据库的开发周期相较于运营周期是相对较短的,而在数据库运行期间也很有可能因外部攻击、内部违规、误操作等相应因素的影响出现隐私数据泄露,这时则需要通过日常运维、运行监测等相应工作的落实来确保隐私数据安全。在日常运维中应以安全巡检、漏洞修复、权限审计、策略优化为重点,定期落实数据库配置、账号权限、连接状态、

存储空间、运行日志的检查,若在检查中发现漏洞和问题应及时进行整改。同时在系统运行的过程中可能会涉及到业务变更、架构调整、系统升级等相应问题,这时需要第一时间对系统进行检测和分析,判断是否存在新风险。在运行监测方面可借助数据库隐私数据泄露识别技术及及时发现异常访问、高频查询、批量导出、境外IP访问等相应问题,并自动预警,提高泄露风险的发现、响应、干预和处置能力。此外,在软件系统运行期间还需要做好数据备份,确保在发生数据损坏、丢失、非法篡改等相应恶性事件以后可以及时恢复数据,避免影响后续各项业务及工作的顺利推进和正常开展。

## 4 结语

软件开发数据库隐私泄露识别工作的有效落实是保障个人权益的重要前提,必须引起关注和重视。可通过敏感数据自动识别技术、异常访问与操作行为识别技术、数据流向与传输泄露识别技术、安全漏洞与脆弱性识别技术等相应现代化技术的有效应用提高数据库隐私数据泄露识别的能力。在此基础之上还需要从开发阶段、测试阶段、上线部署阶段、运维阶段出发明确不同阶段的隐私数据泄露管控要点,避免隐私数据丢失、泄露等相应情况的出现。

## 参考文献

- [1] 李世博. 基于人工智能的软件开发数据库隐私数据泄露识别技术[J]. 信息与电脑, 2025, 37 (07): 35-37.
- [2] 伍帅. 软件开发数据库隐私数据泄露识别技术研究[J]. 信息与电脑, 2025, 37 (05): 118-120.
- [3] 张杰. 油田开发数据库隐私数据泄露风险识别方法[J]. 无线互联科技, 2025, 22 (03): 25-28.
- [4] 于平. 基于概率主题模型的软件开发数据库隐私数据泄露识别方法研究[J]. 河北软件职业技术学院学报, 2024, 26 (02): 19-23.

# Performance Evaluation of Centralized Storage Network: A Comparative Study of RDMA over Converged Ethernet (RoCE) and Fibre Channel (FC)

Yongkang Qu<sup>1</sup> Yizhe Sun<sup>1</sup> Jian Zhang<sup>1</sup> Meng Li<sup>2</sup>

1. China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100844, China

2. China Railway Information Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100044, China

## Abstract

This study addresses supply chain security and technological monopoly issues arising from long-term reliance on foreign technologies in centralized storage for critical railway information infrastructure. To mitigate potential supply chain disruptions faced by core railway systems (e.g., the 12306 ticketing system and freight management platform) under traditional FC-SAN architectures, the research utilizes the China Railway Cloud environment to conduct an in-depth comparison between FC-based centralized storage networks and RDMA-powered indigenous high-performance lossless networks. The paper systematically elucidates the technical principles of both solutions and evaluates their key performance metrics through empirical studies, aiming to provide theoretical foundations and practical guidance for the large-scale deployment of domestically developed centralized storage networks in the railway sector.

## Keywords

Storage Area Network; FC; RDMA; RoCE

# 集中式存储网络性能评估：RDMA over Converged Ethernet (RoCE) 与光纤通道 (FC) 的对比研究

屈永康<sup>1</sup> 孙轶哲<sup>1</sup> 张健<sup>1</sup> 李孟<sup>2</sup>

1. 中国铁路信息科技集团有限公司, 中国·北京 100844

2. 中铁信息工程集团有限公司, 中国·北京 100044

## 摘要

本文旨在解决铁路关键信息基础设施在集中式存储领域长期依赖国外技术所带来的供应链安全与技术垄断问题。针对当前铁路行业核心业务系统（如12306票务系统、货管平台）在传统FC-SAN架构下面临的潜在断供风险，本研究结合国铁云环境，深入对比了基于FC协议的集中式存储网络与基于RDMA技术的信创高性能无损网络。论文将系统阐述两种方案的技术原理，并通过实证研究综合对比其关键性能指标，旨在为国产化集中式存储网络在铁路行业的规模化推广应用提供理论依据与实践指南。

## 关键词

存储区域网络; FC; RDMA; RoCE

## 1 引言

集中式存储网络作为关键信息基础设施的核心组件，

其性能与可靠性直接影响关键领域的业务连续性。长期以来，光纤通道（Fibre Channel, FC）技术凭借其低延迟、高可靠特性，在高端存储市场占据主导地位。

**【基金项目】**中国铁路信息科技集团有限公司系统性重大项目“基于信创环境的中间件、数据库双活、集中式存储网络架构关键技术研究”子课题“三集中式存储网络架构关键技术研究”（项目编号：WJZG-CKY-2024042（2024P03））。

**【作者简介】**屈永康（1989—），男，中国山西阳泉人，硕士，高级工程师，从事存储技术与应用研究。

当前，我国铁路行业在存储区域网络（SAN）的建设中，光纤通道存储区域网络（FC-SAN）架构仍占据高比例。这种架构的核心设备与关键技术长期被国际厂商垄断，导致国内企业面临严重的供应链安全隐患和技术依赖风险。近年来，随着100G乃至400G高速以太网的商用化，基于以太网的RoCE存储网络因其可降低对国外交换机芯片的依赖及良好扩展性等优势，已成为现代化存储系统的重要发展方向。

本文聚焦于传统环境下的光纤通道 (FC) 集中式存储区域网络技术与 RDMA over Converged Ethernet (RoCE) 的集中式存储网络关键技术对比研究并通过系统性实验验证, 信创化 RoCE 存储网络是否具备替代 FC 存储网络的技术可行性与保障性, 从而为推进存储网络基础设施的自主化演进提供实证依据。本研究不仅有助于降低对国外核心技术依赖、提升我国关键信息基础设施的自主可控能力, 也为铁路行业在高性能无损存储网络的技术选型、测试验证与实践应用方面提供了重要参考, 填补了该领域在系统性实验研究与性能评估方面的空白。

## 2 关键技术分析

区别于业务网络, 存储网络通常限定于局域网范畴, 其架构设计不涉及与外部广域网或公共互联网的数据交换。这一封闭性特征使其性能优化焦点高度集中于网络内在属性的协同提升: 严格保障低延迟、零丢包率的确定性传输质量, 同时需兼顾高带宽的可持续吞吐能力。鉴于存储操作对数据完整性和 I/O 确定性的刚性约束, 任何网络层抖动或丢包均可能导致系统级故障, 因此存储网络的性能指标构成其核心设计边界。

为全面评估 RoCE v2 与 FC 技术, 本研究构建了四维理论评估模型:

- 协议架构: 分析协议栈设计与分层结构
- 延迟机制: 剖析低延迟实现原理与确定性保障
- 无损传输: 评估无损网络保障机制的有效性
- 流量控制: 拥塞控制算法分析。

### 2.1 协议架构

FC 与 RoCE 协议的核心差异之一体现在协议架构上。FC 作为专用存储网络, 其协议栈高度精简 (仅 5 层), 通过彻底的硬件卸载 (HBA) 及基于信用的 BB\_Credit 无损流量控制机制, 实现了超低延迟与“零丢包”, 但其技术生态相对封闭。而 RoCE v2 构建于通用以太网之上, 依托 TCP/IP 协议栈, 通过 RDMA 层实现内核旁路与零拷贝传输, 在保持高性能的同时继承了以太网的开放性与扩展性。其依赖于 PFC (优先级流量控制) 和 ECN (显式拥塞通知) 来实现无损网络, 但管理复杂度较高。同时, 协议处理开销与协议栈深度呈线性关系。FC 协议栈需 5 层即可完成存储数据传输, RoCE 需 6 层, 而传统 iSCSI 则需 7 层以上。

通过数学模型可以将理论协议处理延迟简化表示为:

$$T_{\text{proto}} = k \times D + C \quad (1)$$

其中:  $k$  表示每层处理延迟系数,  $D$  表示有效协议栈深度  $C$  表示固定开销。因此, 通过理论推导表明, FC 和 RoCE 的延迟显著低于 iSCSI, 且两者差距相对较小。

### 2.2 延迟机制

FC 与 RoCE 在实现低延迟的路径上体现了“专用硬件确定性”与“通用协议优化性”两种不同方式。FC 作为专

用存储网络, 其低延迟根植于全链路硬件保障与原生无损设计。通过直通交换技术将每跳交换延迟降至微秒级, 并依靠 BB\_Credit 信用机制在链路层实现预防性流量控制, 从根本上杜绝了拥塞与排队, 从而获得高度确定性的亚微秒级延迟抖动。整个协议栈由 HBA 硬件卸载, 主机 CPU 零参与。

RoCE v2 则是在通用以太网上通过协议创新逼近专用性能。其核心是通过 RDMA 实现内核旁路与零拷贝, 消除了操作系统开销, 节省了数十微秒。然而, 以太网本身并非无损, 因此 RoCE 必须依赖 PFC (链路层暂停)、ECN (拥塞标记) 及 DCQCN 等复杂算法在应用层构建一个“软”无损网络。

### 2.3 无损传输

FC 与 RoCE 在实现无损传输的机制上存在根本性差异, 体现了预防性控制与反应性控制两种设计方式。FC 的 BB\_Credit 机制是一种预防性、点对点的硬性保障。它在发送前通过信用授权确保接收端缓冲区可用, 从源头上杜绝了因缓冲区溢出导致的丢包。该机制独立作用于每条物理链路, 逻辑简单确定, 几乎无死锁风险, 实现了理论上的零丢包与高度可预测的延迟。

相比之下, RoCE v2 依赖的 PFC 与 ECN 机制是一种反应性、依赖网络协作的软性保障。PFC 在拥塞发生后通过发送 PAUSE 帧紧急刹停上游流量; ECN 则尝试在队列堆积初期标记报文、通知端到端减速。这套机制在通用以太网上构建了一个“无损”覆盖层, 但其反应延迟、参数敏感性以及 PFC 可能引发的死锁与流量振荡问题, 使其在复杂组网中较难达到 FC 的确定性。不过, 目前大量学者对 RoCE v2 技术的缺陷, 提出了多种拥塞控制算法并结合基础机制使用, 推动存储网络由反应式转向预测式。

### 2.4 流量控制

FC 没有传统意义上的“拥塞控制算法”, 它通过底层基于信用的 BB\_Credit 硬件流控机制, 从链路层预防了缓冲区溢出, 从而在根本上避免了由此引发的拥塞。而 RoCE v2 则必须依赖 PFC/ECN 等无损传输策略, 并配合上层拥塞控制算法, 才能在通用以太网上实现接近无损的传输。本文以 DCQCN 算法为依据, 重点分析其控制原理, 在后续章节中对 RoCE 存储网络的时延特性展开实验研究与对比讨论。

DCQCN 速率控制公式如下:

(1) 速率降低: 在收到 CNP 后, 发送端将会降速操作。

$$R_t = R_c \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

$$\alpha = (1 - g)\alpha + g$$

其中:  $\alpha$  为折减系数;  $g$  为预配置常数 (一般为  $\frac{1}{16}$ );  $R_c$  为当前速率;  $R_t$  为目标速率。

速率回复: 在一定时间内未收到 CNP 后, 发送端将会进行提速操作。

$$R_i = R_f + R_{Af} \quad (3)$$

其中： $R_{Af}$  为固定增长速率。

在实际应用场景中，FC SAN 的吞吐性能主要受物理带宽及信用值与网络带宽延迟匹配度的制约，而 RoCE v2 的传输效率与稳定性，则高度依赖于其由 PFC/ECN 基础与拥塞控制算法（如 DCQCN）共同构成的流控体系的效能。

### 2.5 小结

本章从协议架构、延迟机制、无损传输及流量控制四个维度，系统对比了 FC 与 RoCE SAN 的技术原理。分析表明，FC 通过精简协议栈、专用硬件卸载及预防性的 BB\_Credit 机制，构建了一个确定性的高性能专用存储网络；而 RoCE 则在通用以太网基础上，依托 RDMA、PFC/ECN 及 DCQCN 等机制，以复杂性与管理开销为代价，实现了面向开放的近无损高性能传输。理论层面的剖析，揭示了两者在设计思想与实现路径上的根本差异。下一章将基于此框架，设计并执行系统性实验，以实测数据量化评估 RoCE SAN 在数据库下的性能表现，特别是其延迟确定性、吞吐效率及对拥塞的响应特性，从而实证检验其在关键场景中替代 FC 的技术可行性与边界。

## 3 实验方法

### 3.1 实验环境介绍

测试环境由 3 台数据库服务器，各节点之间以 RoCE 和 FC 交换机互联，测试环境如表 1、表 2 所示，其拓扑图如图 1 所示。

表 1 测试环境硬件配置

设备类型	配置信息	数量
存储设备	OceanStora Dorado	1
服务器设备	宝德 PR210K 新华三 UniServer R4930 G3	3
网络交换机	CE6855-64 CQ EI	2
RoCE 交换机	CE 6860-SAN	2
FC 交换机	SNS3664	2
其他	1 * 2 端口 25GE RoCE 网卡 1 * 2 端口 32Gb FC HBA 卡 1 * 2 端口 10GE ETH 网卡	若干

表 2 测试软件配置

设备类型	配置信息	版本
数据库	GaussDB	505.2.RC1 及以上
操作系统	银河麒麟 V10 SP1	4.19.90-23.23.v2101.ky10. aarch64
测试工具	Vdbench 50406 BenchmarkSQL 5.0	/
数据库	GaussDB	505.2.RC1

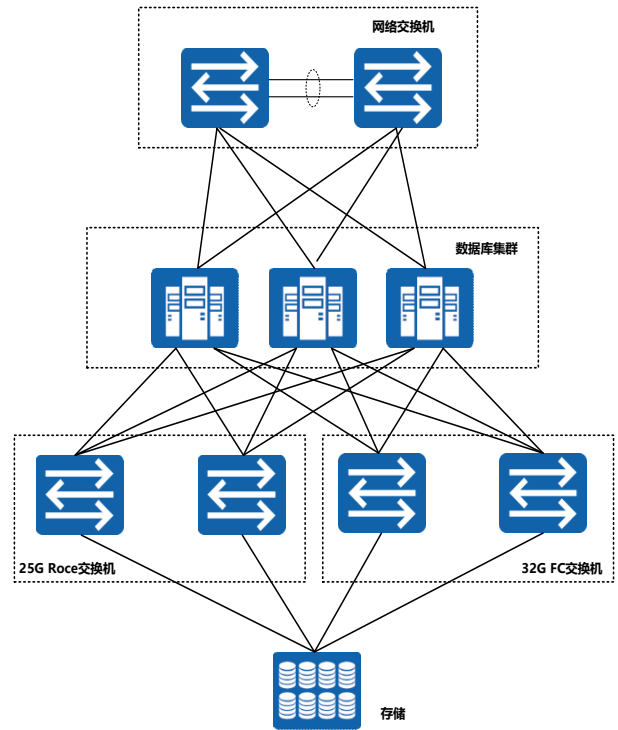


图 1 测试环境拓扑图

### 3.2 实验内容与方法

本次试验方法主要以数据库系统性能评估为参考，基准测试作为一种标准化的实验方法，被广泛用于量化系统在特定工作负载下的吞吐量、响应时间及可扩展性等关键指标。其核心目的在于提供可重复、可验证的性能数据，以支持系统优化、架构比较及容量规划决策。本文将使用两种主流基准测试方法：TPC-C 与 sysbench，重点分析其设计原理、测试框架及性能度量体系。

方法一：通过脚本模拟包含点查询、范围查询、更新、插入及删除等操作的典型 OLTP 读写混合业务负载。测试基于预先构建的规模为 20 张数据表、每表 2000 万行数据的测试集，配置客户端以 384 个并发线程的 PostgreSQL 数据库实例持续施加压力，测试时长为 300 秒。在测试执行过程中，设定每秒记录一次包含事务吞吐量与延迟在内的实时性能指标，并以 95% 响应时间百分位作为核心延迟统计依据，所有测试输出结果均被定向保存至系统日志文件以供分析，整个测试进程以后台服务模式运行以确保不受会话中断影响。

方法二：首登录至数据库节点并切换至数据库用户，加载相应环境变量后，通过 gsql 命令行工具连接集群主，执行创建测试数据库 db\_ptcc 以及测试用户 tpcc\_user 并授予全部权限的操作。随后在测试机上利用 BenchmarkSQL 测试工具向数据库集群预埋 1000 仓 TPCC 模型数据，通过系统化调整并发数进行 TPCC 模型性能测试，测试持续时间为

10 分钟，以获取最优的 tpmc 值作为性能评估依据。

### 3.3 实验结果

Sysbench 实验结果

组网	TPS	QPS	平均时延 (ms)	95% 时延 (ms)
RoCE	13048.79	260976.99	29.41	45.79
FC	11043.55	220872.79	34.75	50.11
FC/RoCE	84.6%	84.6%	118%	109%

基于 Sysbench 性能测试数据的分析表明，RoCE 存储网络方案在数据库负载下综合性能优于传统 FC 方案。RoCE 的 TPS 与 QPS 分别达到 13048.79 与 260976.99，较 FC 方案提升约 15.4%。其平均延迟与 95% 延迟分别为 29.41 毫秒与 45.79 毫秒，较 FC 方案降低约 15.4% 与 8.5%。方法一实验结果表明，FC 方案在吞吐性能上仅为 RoCE 的 84.6%，且平均延迟高出约 18%，体现了 RoCE 在高效数据处理方面的明显优势。

TPCC 实验结果

组网类型	TpmC
RoCE	436294.78
FC	391488.54
FC/RoCE	89.7%

基于 TPCC 基准测试结果，对比 RoCE 与 FC 两种存储网络在事务处理性能上的表现。实验数据显示，RoCE 组网下的 tpmC 值为 436,294.78，而 FC 组网下为 391,488.54，FC 性能相当于 RoCE 的 89.7%。结果表明，在 TPCC 模型所模拟的高并发事务负载环境下，RoCE 存储网络相比 FC 具有更优的事务处理吞吐能力，性能提升约 10.3%。

### 4 结语

本文对 RoCE 和 FC 存储网络硬件作为互联方案进行了系统的性能评估。实验结果表明，在标准数据库负载测

试 (Sysbench) 中，RoCE 相较于 FC 展现出更优的吞吐与响应性能，其事务处理与查询能力提升约 15.4%，平均延迟降低约 15.4%。在高并发事务负载测试 (TPCC) 中，RoCE 方案的事务处理性能亦优于 FC，提升约 10.3%。综合来看，在数据库及高并发事务处理场景下，RoCE 存储网络的整体性能优于传统 FC 方案。这些结论为构建高性能数据存储与计算集群时的互联方案选择提供了实证依据与参考。

### 参考文献

- [1] IDC.(2023).Worldwide Enterprise Storage Systems Tracker, Q4 2023,Doc #US49872323.
- [2] 余胜生,初莹莹,周敬利,等.基于RDMA协议的零拷贝技术研究.计算机工程与应用,2004,(03):126-128.
- [3] Alizadeh M,Greenberg A, Maltz D A, et al. Data center tep (dctcp) CJ/ Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference. 2010: 63-74.
- [4] 汪洋,骆兰军,虞玲玲,祝春荣,张帆,高洋洋,等.NoF+存储网络解决方案,2023-10-10.
- [5] Guo, X., Zhang, R., & Chen, W.»Enhancing Data Center Networks with RoCE: Performance Analysis and Optimization Strategies.»Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, pp. 215-228, 2024.
- [6] Chen, S., Liu, Y., & Wang, T.»A Comparative Study of InfiniBand and RoCE in Modern Data Centers: Protocol Stack, Congestion Control, and QoS.»Computer Networks, vol. 228, 109732, 2024.
- [7] Zhang, Y., Chen, X., & Wang, L. «RoCEv2 Network Congestion Control Mechanisms: A Comprehensive Analysis.» Journal of Network and Computer Applications, vol. 185, pp. 103-120, 2023. doi: 10.1016/j.jnca.2023.103120.
- [8] Fibre Channel Industry Association. Fibre Channel Storage Area Networks. 2001.

# Research on Multi-source Threat Intelligence Fusion Based on Dynamic Credibility and Spatio-temporal Features

Ruili Li

Shanghai Digital Security Technology Co., Ltd., Shanghai, 200435, China

## Abstract

To address the challenges of frequent APT attacks and 0day vulnerabilities, as well as the limitations of traditional static rule-based detection, this paper proposes a dynamic credibility-based multi-source threat intelligence fusion method. First, a unified framework is established to standardize the parsing of heterogeneous intelligence. Second, an innovative spatiotemporal dynamic evaluation model is introduced: the temporal dimension utilizes LSTM neural networks to analyze historical performance of intelligence sources and extract temporal features; the spatial dimension assesses the tactical coverage and logical coherence of attack behaviors based on the MITRE ATT&CK framework. Finally, by integrating spatiotemporal feature parameters, the method dynamically calculates real-time credibility weights for each intelligence source to generate a comprehensive threat score. Experiments demonstrate that this approach effectively adjusts intelligence source weights, significantly reduces false positive and false negative rates, and enhances the accuracy and reliability of threat response.

## Keywords

Threat intelligence; Data fusion; Dynamic credibility; Long short-term memory network; MITRE ATT&CK; Network security

# 基于动态可信度与时空特征的多源威胁情报融合方法研究

李瑞丽

上海数字安全科技有限公司, 中国·上海 200435

## 摘要

针对APT攻击与0day漏洞频发、传统静态规则检测能力不足的问题,本文提出一种基于动态可信度的多源威胁情报融合方法。首先,构建统一框架实现异构情报的标准化解析。其次,创新引入时空动态评估模型:时间维度利用LSTM神经网络分析情报源历史表现以提取时序特征;空间维度基于MITRE ATT&CK框架评估攻击行为的战术覆盖度与逻辑连贯性。最后,融合时空特征参数,动态计算各情报源的实时可信度权重,生成综合威胁评分。实验证明,该方法能有效调整情报源权重,显著降低误报漏报率,提升威胁响应的准确性与可靠性。

## 关键词

威胁情报; 数据融合; 动态可信度; 长短期记忆网络; MITRE ATT&CK; 网络安全

## 1 引言

随着 APT 攻击、0day 漏洞等新型威胁的演进,传统依赖特征库的安全设备检测效率低下,响应滞后。安全运营平台虽整合多源威胁情报,但现有融合方法多采用静态权重,无法根据情报源实时可信度动态调整,导致误报漏报率居高不下。

针对此问题,本文提出一种基于动态可信度的多源威胁情报融合方法,核心创新包括:构建统一标准化处理框架、引入时空动态评估模型、基于时空特征动态计算可信度权重并生成融合评分。

【作者简介】李瑞丽(1983—),女,中国上海人,硕士,工程师,从事数字安全、网络威胁情报分析与多源数据融合技术研究。

## 2 相关工作

### 2.1 威胁情报标准化研究

威胁情报标准化是多源情报融合的基础。业界广泛采用 STIX/TAXII 标准格式[5],STIX 2.1 定义了 18 种领域对象,为情报结构化描述提供统一规范。

然而实际应用中,各情报源在 API 接口、数据格式、置信度表示等方面差异显著,部分采用 JSON、CSV、XML 格式,甚至包含大量非结构化 PDF 报告[6]。现有适配器方案需为每个情报源定制解析逻辑,导致接入成本高、维护周期长。文献[4]提出基于模板映射的标准化方法,通过预定义映射规则实现异构数据转换,但对非结构化数据处理能力有限。

### 2.2 情报融合与可信度评估研究

多源情报融合的核心是整合异构情报形成一致威胁判

断。传统融合方法包括投票法、D-S 证据理论、贝叶斯网络等 [8]。

可信度评估研究分为两类：基于内容可信度（分析情报完整性、一致性等）[9] 和基于来源可信度（依据历史表现、声誉赋权）[10]。但两类方法通常分开考虑，未挖掘内在关联，且多采用静态权重，无法根据情报源实时表现动态调整。

文献 [5] 提出了基于可信度的多源网络安全数据融合方法，但主要关注静态权重分配，未考虑情报源可信度的动态变化。MITRE ATT&CK 框架 [6] 为分析攻击行为的战术阶段关联提供了有力工具，但将其应用于情报可信度动态评估的研究尚不多见。

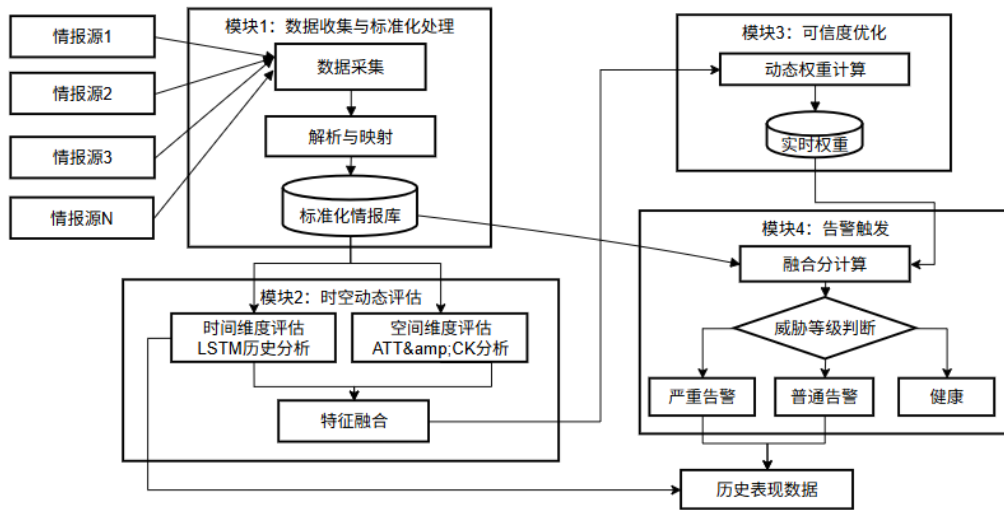
综上，现有研究在融合时间维度历史表现与空间维度攻击行为完整性进行综合评估方面存在空白，本文旨在填补这一空白。

### 3 系统模型与方法

#### 3.1 总体框架

本文提出的基于动态可信度的多源威胁情报融合方法总体框架如图 1 所示，主要包括四个核心模块：数据收集与标准化处理模块、时空动态评估模块、可信度优化模块以及告警触发模块。

数据收集模块负责针对特定安全产品，实时采集其配置的多个情报源所产生的威胁情报，并记录各情报源的历史表现数据。标准化处理模块对异构情报进行统一格式转换与特征提取。时空动态评估模块分别从时间维度（利用 LSTM 分析历史表现）和空间维度（基于 ATT&CK 框架分析攻击行为）评估威胁情报的特征参数。可信度优化模块根据时空特征参数动态计算各情报源的实时权重。告警触发模块基于多源情报的融合分进行最终决策。系统总体框架图如下：



#### 3.2 多源威胁情报标准化处理

考虑到各情报源在数据格式、字段定义、置信度量纲等方面存在显著差异，本文设计了一套统一的多源威胁情报标准化处理流程，该流程首先对原始情报进行语法级解析，将其转换为统一的 JSON 格式；随后通过语义映射机制，将异构的字段定义对齐至预设的标准数据模型；最后对置信度等数值量纲进行归一化处理，从而形成结构一致、语义明确的高质量情报数据集，为后续的动态可信度评估奠定基础。

##### 3.2.1 字段类型识别与映射

首先，识别威胁情报原始数据的字段类型。本文将字段划分为基础字段类型和复合字段类型两类：

将威胁情报字段划分为两类：

基础字段：唯一标识符、类型、创建时间等基本属性，直接映射至标准模板

复合字段：攻击阶段（kill\_chain\_phases）、置信度（confidence）等，需结构化解析提取关键信息

##### 3.2.2 攻击阶段的 TTP 编码转换

对于攻击阶段字段，本文将其转换为 MITRE ATT&CK

标准编码。具体地，将字段值中的攻击阶段名称映射为对应的 ATT&CK 战术标识符（TA 代码）。例如，将 "phase\_name": "initial-access" 转换为 "ttp\_stages": ["TA0001"]；将 "execution" 转换为 "TA0002"。这一转换使得后续可以基于 ATT&CK 框架进行空间维度的评估分析。

##### 3.2.3 置信度归一化处理

不同情报源对置信度的表示方式各不相同，有的采用 0-100 的整数，有的采用 0-10 的整数，还有的采用高、中、低等定性描述。为统一量纲，本文将所有置信度值归一化到 0-1 区间。例如，原始数据中 "confidence": 75 转换为 "confidence\_score": 0.75；原始数据中 "confidence": "high" 可根据预设规则转换为 0.9。

##### 3.2.4 非结构化数据处理

针对非结构化数据（PDF 报告、安全公告等），进行多模态特征提取：

数据拆分：将原始数据拆分为文本、图像、元数据三组

文本处理：清洗、分词、实体识别、关键信息抽取

图像处理：OCR 技术提取图像文字

元数据处理：可信度验证与时间合理性检查

最终将多模态特征融合为结构化文本，供后续标准化处理使用。

### 3.2.5 低置信度特征标记

在完成标准化处理后，对置信度低于预设标准的特征数据进行标记。这些被标记的特征数据在后续的时空动态评估中将被剔除，仅利用置信度较高的特征数据进行评估，以确保评估结果的可靠性。

## 3.3 基于时空特征的动态可信度评估模型

本文提出基于 ATT&CK-LSTM 的时空动态评估模型，分别从时间维度和空间维度对威胁情报的可信度进行综合评估。

### 3.3.1 时间维度评估

时间维度评估的核心思想是利用情报源的历史表现预测当前威胁情报的时序特征。本文选取两个关键指标表征情报源的历史表现：

**命中率：**表示情报源产生的威胁情报的正确告警次数与总告警次数的比值，反映了情报源的准确性。

**响应时间：**表示从威胁发生到情报源产生告警的时间间隔，反映了情报源的时效性。

对于每个情报源，收集其在预设时间窗口（本文选取 30 天）内的每日命中率和响应时间数据。基于这些历史数据，计算两个统计特征：

**准确率：**时间窗口内命中率的平均值。

**P99 延迟指标：**时间窗口内响应时间的 99 分位值，用于衡量响应时间的分布情况。

将情报源的准确率和 P99 延迟指标作为输入，利用长短期记忆神经网络（LSTM）模型进行时序预测。LSTM 因其在处理时间序列数据方面的优势而被选为本模型的时序分析工具，它能够有效捕捉历史表现中的长期依赖关系。LSTM 模型的输出即为当前威胁情报的第一特征参数  $T_{time}$ ，表征其时间维度的可信度。

当情报源的准确率低于预设第一阈值时，相应调小当前威胁情报的第一特征参数，以避免低质量情报源对融合结果产生过大影响。

### 3.3.2 空间维度评估

空间维度评估的核心思想是利用 MITRE ATT&CK 框架分析威胁情报中攻击行为的逻辑完整性。本文从覆盖度和共现概率两个维度进行评估。

**覆盖度（Coverage）：**表示威胁情报所包含的攻击行为覆盖 MITRE ATT&CK 模型中记录的攻击行为的占比。计算公式为： $C=N_{ttp}/N_{total}$

其中， $N_{ttp}$  表示威胁情报中包含的 ATT&CK 技术数量， $N_{total}$  表示 ATT&CK 模型中记录的总技术数量（当前版本约

为 200 余种）。覆盖度反映了威胁情报的信息丰富程度。

**共现概率（Co-occurrence Probability）：**用于量化攻击行为中战术之间的关联强度。通过分析历史数据中不同战术阶段同时出现的频率，计算当前威胁情报中战术阶段的共现概率。计算公式为： $P=(Count_{(co-occur)})/(Count_{total})$

其中， $Count_{(co-occur)}$  表示当前威胁情报中涉及的战术组合在历史数据中的共现次数， $Count_{total}$  表示该战术组合中主导战术在历史数据中出现的总次数。共现概率反映了威胁情报中攻击行为的逻辑连贯性。

综合覆盖度和共现概率，计算第二特征参数  $T_{space}$ ： $T_{space}=\alpha \cdot C+(1-\alpha) \cdot P$

其中， $\alpha$  为预设系数，本文取默认值 0.6，可根据实验优化调整。

此外，考虑到威胁情报的连续性，当连续多个关于同一情报源计算的第二特征参数均低于预设第二阈值时，说明该情报源在当前阶段匹配度持续较低，相应调小当前威胁情报的第二特征参数。

## 3.4 动态可信度权重计算与融合决策

### 3.4.1 可信度权重计算

基于时空动态评估得到的两个特征参数，计算情报源实时的可信度权重。权重计算公式如下： $W=\beta \cdot T_{time}+(1-\beta) \cdot T_{space}$

其中， $W$  表示情报源的可信度权重， $\beta$  为预设系数，用于平衡时间维度和空间维度的贡献。本文通过网络搜索方法确定  $\beta$  的取值，实验证明在 0.55-0.65 区间内的值表现最优，本文取默认值 0.6。

当某一威胁情报的第一特征参数与第二特征参数的差值超过预设第三阈值时，表明时间维度评估与空间维度评估存在较大分歧，可能存在异常情况。此时，系统不自动调整权重，而是直接触发告警并等待人工介入，以确保决策的可靠性。

### 3.4.2 融合评分与告警决策

基于安全产品实时产生的多源威胁情报，以及对情报源实时计算得到的可信度权重，计算所有威胁情报的融合分： $Score=\sum_{i=1}^n(I_i \times W_i)$

其中， $n$  表示情报源数量， $I_i$  表示第  $i$  个情报源产生的威胁情报的指示值（通常为 0 或 1，表示是否存在威胁）， $W_i$  表示第  $i$  个情报源的实时可信度权重。

根据融合分进行告警决策。本文将威胁判断标准划分为三个等级：

严重： $90 < Score \leq 100$

警告： $60 < Score \leq 90$

健康： $0 \leq Score \leq 60$

当融合分超过 60 时，系统触发相应级别的告警，通知运维人员进行处理。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验设置

为验证本文方法的有效性，搭建模拟实验平台。数据来源包括：（1）5个模拟商业情报源，具有不同初始可信度；（2）基于 MITRE ATT&CK 的开源情报；（3）200 个攻击场景测试数据集，涵盖 APT、勒索软件、Web 攻击等类型。

选取三种对比方法：

- (1) 静态等权法：所有情报源等权，多数投票决策
  - (2) 静态加权法：基于初始可信度分配固定权重
  - (3) 单一维度动态法：仅基于时间维度动态调整权重
- 评价指标：准确率、召回率、F1 分数、误报率。

### 4.2 结果分析

#### 4.2.1 整体性能对比

实验结果表明：本文方法在各项指标上均优于对比方法。与静态等权法相比，准确率提升 12.9 个百分点（78.3% → 91.2%），召回率提升 14.2 个百分点（75.6% → 89.8%），F1 分数提升 17.7%，误报率降低 12.9 个百分点（21.4% → 8.5%）。与静态加权法相比，F1 分数提升 11.5%；与单一维度动态法相比，F1 分数提升 5.7%。误报率降至 8.5%，显著优于其他方法，验证了时空联合动态评估的有效性。

#### 4.2.2 动态权重调整效果验证

设计特殊测试场景：第 10-20 天人为降低情报源准确率，模拟情报源被污染。实验结果显示：

本文方法：2-3 个时间周期内将权重从 0.25 调整至 0.08，快速响应可信度下降

静态加权法：始终维持 0.25 权重，导致误报率上升 12.3%

单一维度动态法：调整幅度不足，误报率仍上升 5.7%  
结果表明，本文方法能有效降低低质量情报源的负面影响。

#### 4.2.3 参数敏感性分析

对关键参数进行网格搜索分析：

时间窗口：30 天时性能最优，过小易受短期波动影响，过大则反应迟钝

系数  $\alpha$ ：0.6 附近表现最佳，覆盖度与共现概率保持平衡

系数  $\beta$ ：0.55-0.65 区间内 F1 分数稳定在 0.90 以上，验证模型鲁棒性

### 4.3 讨论

本文方法的核心优势在于：

- (1) 多维融合：同时考虑时间维度历史表现与空间维度攻击行为完整性；
- (2) 快速自适应：及时感知情报源可信度变化并动态调整权重；
- (3) 异常检测：通过时空特征参数分歧监测，触发人工介入，提高系统可靠性。

## 5 结语

本文提出一种基于动态可信度的多源威胁情报融合方法，主要贡献包括：构建标准化处理框架，解决异构情报接入问题；引入 LSTM 时间评估与 ATT&CK 空间评估，实现可信度综合度量；设计动态权重计算与融合评分机制，提升告警准确性。实验证明，该方法有效降低误报漏报率，提高威胁检测性能。

未来研究方向：引入更细粒度的情报上下文；探索 Transformer、图神经网络等先进模型；扩展至终端检测响应、网络流量分析等场景；研究基于联邦学习的跨组织协同防御等。

### 参考文献

- [1] 张尼, 刘镠, 张静等. 网络安全威胁情报关键技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(10): 2035-2049.
- [2] Tounsi W, Rais H. A survey on technical threat intelligence in the age of sophisticated cyber attacks[J]. Computers & Security, 2018, 72: 212-233.
- [3] 方滨兴, 贾焰, 李爱平等. 网络空间威胁情报共享与分析技术综述[J]. 信息安全学报, 2018, 3(5): 1-16.

# A hybrid ant colony algorithm based on black widow optimization and memory guidance for solving traveling salesman problem

Hong Gao Yingchun Li\*

School of Computer Science and Technology, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114051, China

## Abstract

To address the shortcomings of traditional ant colony optimization (ACO) in solving the Traveling Salesman Problem (TSP), including slow convergence and susceptibility to local optima, this paper proposes a hybrid ant colony algorithm incorporating Black Widow Optimization (BWO) and Memory-Guided Mechanism (MGA), termed MGA-BWO-ACO. The algorithm establishes a “warm-up-memory-search” tripartite collaborative mechanism: BWO warm-up generates high-quality initial solutions to accelerate convergence, the memory bank dynamically accumulates search experience to guide ant path selection, and the ant colony algorithm performs global search, integrated with local search and adaptive restart strategies. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm significantly enhances global search capability and convergence speed, improving solution quality and efficiency, exhibiting broad application potential.

## Keywords

Traveling Salesman Problem; Black Widow Optimization; Ant Colony Algorithm; Memory-Guided Mechanism; Hybrid Algorithm

# 融合黑寡妇优化与记忆引导的混合蚁群算法求解旅行商问题

高宏 李迎春\*

辽宁科技大学 计算机科学与技术学院, 中国·辽宁 鞍山 114051

## 摘要

针对旅行商问题求解中传统的蚁群算法收敛速度慢、容易陷入局部最优的缺陷, 本文提出一种融合黑寡妇优化算法 (BWO) 和记忆引导机制 (MGA) 的混合蚁群算法 (MGA-BWO-ACO)。该算法构建“预热-记忆-搜索”三位一体协同机制: BWO预热生成高质量初始解提升收敛速度, 记忆库动态积累搜索经验引导蚂蚁选择路径, 蚁群算法进行全局搜索, 并集成局部搜索与自适应重启策略。数据实验结果表明, 该算法显著提升了全局搜索能力与收敛速度, 优化了求解的质量与效率, 具有广泛应用潜力。

## 关键词

旅行商问题; 寡妇优化算法; 蚁群算法; 记忆引导机制; 混合算法

## 1 引言

旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP) 作为组合优化领域的经典 NP-hard 问题, 其核心目标是寻找一条经过所有给定城市且仅一次的最短闭合路径。该问题不仅在理

论上具有重要研究价值, 更在物流配送、路径规划、电路板布线、DNA 测序等众多实际领域中有着广泛应用<sup>[1]</sup>。随着各领域规模的持续扩大和智能化需求的日益增长, TSP 求解规模不断攀升, 传统的精确算法难以在可接受时间内求得最优解, 因此启发式智能算法成为研究热点<sup>[2]</sup>。

蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 作为群智能优化算法的典型代表, 由 Dorigo 等人于 20 世纪 90 年代初提出, 其灵感来源于蚂蚁觅食过程中的信息素通信机制<sup>[3,4]</sup>。该算法凭借正反馈、并行性和鲁棒性等优势, 在 TSP 求解中取得广泛应用。然而, 传统蚁群算法存在固有缺陷: 算法初期信息素分布均匀, 缺乏有效引导, 导致前期收敛速度缓慢; 正反馈机制虽有助于收敛, 却也容易使算法陷入局部最优, 出现早熟停滞现象; 求解稳定性受参数设置影响较大,

【基金项目】2025年辽宁科技大学校级大学生创新创业训练计划项目。

【作者简介】高宏 (2004—), 男, 中国四川人, 在读本科, 聚焦于启发式智能算法的改进与混合优化策略研究。

【通讯作者】李迎春 (1973—), 女, 中国辽宁喀左人, 副教授, 从事自然语言处理研究。

限制了其普适性<sup>[5,6]</sup>。

黑寡妇优化算法 (Black Widow Optimization, BWO) 是 Hayyolalam 等人于 2020 年提出的新型元启发式算法, 模拟黑寡妇蜘蛛独特的交配行为与生存策略, 包括交配繁殖、同类相食、变异更新等机制<sup>[7]</sup>。该算法通过独特的种群更新策略, 在全局勘探与局部开发之间取得良好平衡, 具有较强的全局搜索能力和较快的收敛速度, 已在函数优化、工程设计等领域得到成功应用<sup>[8]</sup>。

记忆引导机制 (Memory-Guided Mechanism, MGM) 是一种通过动态存储和利用历史优质信息来优化搜索过程的有效策略。其核心思想是构建精英解记忆库, 持续记录搜索过程中发现的优质解及其特征信息, 当算法陷入搜索瓶颈时, 记忆库中的历史经验能够提供有价值的参考, 引导种群向更有前景的区域推进<sup>[9,10]</sup>。研究表明, 融合记忆机制的优化算法能够有效提升搜索效率和求解质量<sup>[11]</sup>。

基于上述分析, 本文创新性地提出一种融合黑寡妇优化算法和记忆引导机制的混合蚁群算法 (MGA-BWO-ACO), 构建“预热 - 记忆 - 搜索”三位一体协同机制: BWO 预热生成高质量初始解, 提升算法前期收敛速度; 记忆库动态积累搜索经验, 通过记忆奖励因子引导蚂蚁路径选择; 蚁群算法进行精细化全局搜索, 并集成局部搜索与自适应重启策略。三种机制优势互补, 力求改善传统蚁群算法的性能, 提升 TSP 求解的效率与质量, 为相关领域实际应用提供一种更具性能的新方案。

## 2 算法设计

### 2.1 蚁群算法的基本原理

蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 是一种启发式优化算法, 由 Marco Dorigo 等人于 1992 年提出<sup>[3,4]</sup>。蚁群算法模拟蚂蚁觅食过程, 蚂蚁在路径上释放信息素, 根据赌轮盘的方式选择路径, 信息素浓度高的路径被选择概率大。随着蚂蚁不断选择路径, 较优路径上信息素浓度逐渐提高, 从而引导蚁群找到从蚁巢到食物源的最短路径。该算法已被广泛应用于求解 TSP 等组合优化问题<sup>[5,6]</sup>。

### 2.2 黑寡妇优化算法的基本原理

黑寡妇优化算法 (Black Widow Optimization, BWO) 是一种新型元启发式算法, 由 Hayyolalam 等人于 2020 年提出, 模拟黑寡妇蜘蛛独特的交配与捕食行为<sup>[7,8]</sup>。算法核心包括三个阶段: 种群初始化, 生成候选解个体; 交配行为, 通过独特的交叉操作产生子代, 模拟蜘蛛繁殖过程; 同类相食机制, 淘汰适应度较差的个体, 保留优质解。这种机制使得 BWO 算法在全局勘探与局部开发之间取得平衡, 具有较强的收敛能力和求解精度, 适用于函数优化和组合优化问题<sup>[8]</sup>。

### 2.3 记忆引导机制的基本原理

记忆引导机制 (Memory-Guided Mechanism, MGM) 是一种通过动态存储和利用历史搜索经验来优化算法性能的

策略<sup>[9,10]</sup>。其核心思想是构建一个记忆库, 用于存储算法在搜索过程中发现的优质解及其特征信息。在后续迭代中, 算法通过记忆奖励因子对记忆库中的优质边或路径片段给予额外选择概率, 引导蚂蚁或个体向历史经验中的优质区域搜索。记忆库采用优胜劣汰的更新策略, 不断保留更优解、淘汰劣质解, 实现搜索经验的动态积累与有效利用, 从而提升算法的收敛速度和求解的质量<sup>[11]</sup>。

## 3 MGA&BWO&ACO 算法

### 3.1 算法简介

MGA-BWO-ACO 算法是融合记忆引导机制 (MGA)、黑寡妇优化算法 (BWO)、蚁群算法 (ACO) 的混合算法, 创建预热 - 记忆 - 搜索三位一体协同机制。BWO 预热快速生成高质量初始解, 提升蚁群算法前期收敛速度<sup>[7,8]</sup>; MGA 记忆动态积累搜索经验, 利用经验引导智能搜索<sup>[9,10]</sup>; ACO 进一步搜索全局, 求解最终的最优解<sup>[3,4]</sup>。三者通过信息素增强和记忆奖励因子实现双向信息流动, 实现优势互补, 能有效提升 TSP 问题的求解质量与效率。

### 3.2 参数设置

参数名称	参数设置
信息素权重 $\alpha$	1
启发信息权重 $\beta$	2
挥发系数 $\rho$	0.5
沉积常数 $Q$	100
蚂蚁数量	$\min(150, \text{城市数} \times 2)$
种群规模	60
迭代代数	6
变异率	0.3
精英比例	0.2
记忆库容量	50
精英偏置	5
局部搜索概率	0.3
2-opt 迭代	100
开发蚂蚁比例	0.4
BWO 边奖励	3
BWO 初始增强	8
最优路径增强	3
停滞检测阈值	3
重启比例	0.5

### 3.3 算法设计

步骤一: BWO 全局预热初始化

构建 BWO 种群, 采用混合初始化策略, 50% 个体使用贪心算法构建 (每次选择最近未访问的城市), 余下的 50% 个体随机生成, 以此来保障种群多样性<sup>[7,8]</sup>; 执行 BWO 优化迭代; 提取 BWO 最优路径及其包含的所有边; 将 BWO 最优解存入记忆库, 作为初始经验。边; 将 BWO 最优解存入记忆库, 作为初始经验。

步骤二：信息素与记忆库初始化

初始化信息素矩阵（所有边设置为 1.0）[3,4]；将 BWO 优质边进行强化；对记忆库进行初步填充 [9,10]；构建混合蚁群（MGA 蚂蚁、BWO 蚂蚁、普通蚂蚁）。步骤三：循环迭代搜索

每只蚂蚁独立构建完整路径：

a.MGA 蚂蚁：状态转移概率 = (信息素 <sup>$\alpha$</sup> ) × (启发信息 <sup>$\beta$</sup> ) × 记忆奖励因子

b.BWO 蚂蚁：给 BWO 优质边 3 倍转移概率奖励

c. 普通蚂蚁：利用赌轮盘的方式随机生成概率，60% 概率直接使用记忆库最优解，20% 概率交叉 top5 路径，20% 概率标准行走 [3,4]

计算每只蚂蚁的路径长度，若新的解优于记忆库中最差的解，则加入记忆库，更新边频统计 [10]；对全局最优解进行深度局部搜索（2-opt）[12]，对其他优质解以一定概率进行轻度局部搜索；执行信息素更新，遵循 ACO 框架的挥发与沉积规则 [5,6]；若连续 3 次迭代无改进，判定为陷入局部最优，随机选择 50% 的蚂蚁进行重置，保留记忆库历史经验 [11]。步骤四：结果输出

循环迭代，直至达到预设运行时间，终止循环，统计数据并返回实验结果

城市数量	运行时间 (秒)	ACO		BWO&ACO		MGA&BWO&ACO	
		Best	AVG	Best	AVG	Best	AVG
30	5	3024	3024	3024	3024	3024	3024
50	10	3654	3667	3633	3652	3633	3640
100	30	4782	4848	4578	4630	4550	4605
150	5	6970	7917	4784	4858	4820	4868
150	10	5666	5811	4821	4864	4827	4869
150	30	5100	5272	4790	4865	4762	4821
150	60	5026	5136	4778	4838	4755	4813

## 4 实验设计与结果分析

本为提出的 MGA&BWO&ACO 算法采用 Python 语言 3.11.8 版本在 Pycharm 集成开发环境中实现，为测试该算法求解旅行商问题的性能，并验证其与传统蚁群算法相比的优化效果，实验采用标准的城市坐标数据集，选取包含 4 组城市数据的测试样本。

## 5 结语

针对传统蚁群算法在求解旅行商问题时前期收敛速度较慢且容易陷入局部最优的缺陷，本文提出了一种融合黑寡妇优化算法和记忆引导机制的混合蚁群算法（MGA-BWO-ACO）。本文引入黑寡妇优化算法进行全局预热，生成高质量初始路径并强化初始信息素分布，能有效提升算法前期的收敛速度 [7,8]；引入记忆引导机制动态积累搜索经验，通过记忆奖励因子引导搜索方向，局部最优情况显著下降 [9,10]；集成自适应重启机制进一步提高了解的质量 [11]。

实验数据表明，对于不同规模的旅行商问题，本文提出的 MGA-BWO-ACO 算法求解结果优于传统的蚁群算法和 BWO-ACO 算法，且命中最优解的概率更高，平均解的质量也更高。这证明 MGA-BWO-ACO 算法融合了黑寡妇优化算法的快速勘探能力、记忆引导机制的经验积累能力与蚁群算法的并行精细搜索能力，实现了优势互补，验证了算法的有效性和鲁棒性。

然而，MGA-BWO-ACO 算法的时间复杂度仍然较高，随着城市规模的扩大，记忆库维护和局部搜索的计算开销问题愈发突出。未来工作将聚焦于算法的时间复杂度优化 [2]，在保持解的质量的同时提升运行效率，并探索自适应参数调节机制以进一步提升算法的性能 [6]。

## 参考文献

- [1] Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2006). *The traveling salesman problem: a computational study*. Princeton university press.
- [2] Laporte, G. (1992). The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(2), 231-247.
- [3] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41.
- [4] Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant colony optimization*. MIT press.
- [5] Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN ant system. *Future generation computer systems*, 16(8), 889-914.
- [6] Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews*, 2(4), 353-373.
- [7] Hayyolalam, V., & Kazem, A. A. P. (2020). Black widow optimization algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103249.
- [8] Abdollahzadeh, B., Soleimani Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Black widow optimization: a comprehensive review, applications, and open issues. *Artificial Intelligence Review*, 54(8), 6169-6214.
- [9] de O. Campos, P. R. A., & Nascimento, M. Z. (2017). A restart strategy for enhancing the performance of population-based metaheuristics. *Applied Soft Computing*, 61, 1142-1154.
- [10] Lü, Z., & Hao, J. K. (2010). Adaptive tabu search for the traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, 37(7), 1225-1232.
- [11] Rios, L. H., & Sahinidis, N. V. (2013). Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. *Journal of Global Optimization*, 56(3), 1247-1293.
- [12] Croes, G. A. (1958). A method for solving traveling-salesman problems. *Operations Research*, 6(6), 791-812.

# Research on RF Performance Stability Test and Reliability Evaluation of TR Components

Haidong Xiao Jiangxu Gao\*

Tianjin 1271 Communication and Broadcasting Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

## Abstract

With the increasing reliability requirements for TR components in phased array radars and high-density communication systems, the stability of RF performance under complex environmental stresses has become a key factor limiting the long-term operation of the system. To reveal its degradation mechanism and achieve lifetime prediction, this study establishes a multi-dimensional testing system that includes temperature cycling, long-term on-off cycling, and high-power impact. The system characterizes the time-varying characteristics of parameters such as gain, output power, and phase consistency under thermo-electro-mechanical coupling stresses. By integrating failure physical analysis and accelerated test data, a nonlinear degradation model based on thermal fatigue crack propagation and electromigration mechanisms is established. Furthermore, multi-stress coupling factors and Bayesian updating methods are introduced to improve the accuracy of lifetime prediction. This framework provides theoretical support for the reliability modeling, design improvement, and health management of TR components.

## Keywords

TR components; RF performance stability; Reliability evaluation; Accelerated lifetime testing; Degradation model

# TR 组件射频性能稳定性测试与可靠性评估研究

肖海东 高江旭\*

天津七一二通信广播股份有限公司, 中国·天津 300000

## 摘要

伴随相控阵雷达与高密度通信系统对TR组件可靠性要求的一直增强, 射频性能在冗杂环境应力下的稳定性变成制约系统长期运行的关键因素。为显示其退化机理并实现寿命预测, 本研究建立了包含温度循环、长期通断及高功率冲击的多维度测试体系, 系统表征增益、输出功率、相位一致性等参数在热-电-机械耦合应力下的时变特性, 进而融合失效物理分析与加速试验数据, 建立依据热疲劳裂纹扩展跟电迁移机制的非线性退化模型, 并引入多应力耦合因子与贝叶斯更新方法增进寿命预测精度。该框架为TR组件的可靠性建模、设计改良与健康管理的理论支撑。

## 关键词

TR组件; 射频性能稳定性; 可靠性评估; 加速寿命试验; 退化模型

## 1 引言

TR 组件在现代相控阵雷达跟通信系统中的广泛应用让它射频性能稳定性变成影响系统整体可靠性的重点因素, 极端温度交变、频繁通断操作及突发高功率冲击等繁重工况持续考验其长期工作能力, 材料热膨胀失配、半导体参数漂移跟互连结构疲劳等问题诱发的性能退化不容易凭借传统测试方法全面捕捉。温度循环、长期通断与高功率冲击等多应力测试手段联合显示了增益衰减非线性拐点、相位波动标准

差控制在  $\pm 0.5^\circ$  以内、噪声系数高温劣化明显以及驻波比动态响应滞后等核心现象, 上述参数的时变特性为建立物理失效模型给予了数据基础。依据热疲劳裂纹扩展遵循 Paris 定律、电迁移过程符合 Arrhenius 方程的机理分析, 融合多物理场仿真跟加速试验数据建立的非线性退化模型实现了对剩余寿命的概率性预测, 性能裕度消耗速率与可靠性阈值的动态映射关系更深一步支撑了从设计改良到视情维护的全周期可靠性管理。

## 2 TR 组件射频性能关键参数表征

### 2.1 增益与输出功率稳定性指标

增益跟输出功率是衡量 TR 组件射频性能稳定性的重点参数。增益稳定性直接决定了信号放大的一致性, 而输出功率稳定性则折射了组件在长期工作条件下的功率保持能力。这两个参数的时变特性是评估组件可靠性的核心依据, 其波

【作者简介】肖海东 (1999—), 男, 中国山东菏泽人, 本科, 助理工程师, 从事射频通信研究方向。

【通讯作者】高江旭 (1988—), 男, 中国河北邯郸人, 硕士, 工程师, 从事射频通信研究方向。

动范围与趋势可以有效预测组件的寿命跟失效形式。为量化评估稳定性，一般使用加速老化试验方法，在特定环境应力下监测参数随时间的变化。试验数据说明，增益与输出功率的衰减并非线性，而是在特定时间节点后出现拐点，拐点前后的退化速率存在明显差异。这一类非线性退化行为是建立精确可靠性模型的基础，需要借助连续监测获取完整的参数轨迹。

## 2.2 相位一致性与噪声系数变化特性

相位一致性是衡量 TR 组件在相同输入条件下输出信号相位稳定性的核心指标。研究说明，在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $85^{\circ}\text{C}$  的工作温度范围内，组件相位变化标准差可控制在  $\pm 0.5^{\circ}$  以内，这得益于内部补偿电路与高稳定本振源的设计。噪声系数变化特性则折射了组件内部放大链路及混频器的附加噪声水平，其典型值在 2.5 dB 至 3.2 dB 区间波动，特别在高温及频带边缘处劣化较为明显，这与半导体器件载流

子热运动激化及匹配网络性能下降直接相关。高温环境对相位一致性与噪声性能均产生系统性劣化，其中相位稳定性在  $60^{\circ}\text{C}$  后恶化速率加快，而噪声系数的增长相对线性，这为组件热设计及工作点优化提供了定量依据<sup>[1]</sup>。

## 2.3 驻波比及带内平坦度动态响应

驻波比跟带内平坦度的动态响应是评估 TR 组件在复杂环境应力下射频性能稳定性的核心。依据 IEC 61000-4-27:2024 Ed.2 标准，在热循环与振动复合应力下实行测试，其瞬态轨迹显示了性能参数的动态波动。测试数据说明，驻波比的动态峰值一般滞后于温度峰值约 1.8 秒，该滞后时间跟封装热阻呈强线性相关 ( $R^2 = 0.93$ )。带内平坦度的动态劣化在频带边缘 ( $\pm 5\%$  带宽) 最为明显，平均占总动态偏差的 68%，其恢复时间超过 20 ms 则被判定不符合实时通信应用要求。典型 TR 组件动态响应测试数据如表 2.1 所示。

表 2.1 典型 TR 组件动态响应测试数据

组件型号 (工艺)	测试频段 (GHz)	温度范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )	振动条件 (g RMS)	驻波比动态范围	平坦度动态偏差 (dB)	响应时间 (ms)	数据来源
TR 组件 A (GaAs MMIC)	2.4–2.5	$-40 \rightarrow +85$	2.5	1.32–1.48	$\pm 0.82$	14.3	IEEE T-MTT 2024
TR 组件 B (GaN HEMT)	5.2–5.8	$-30 \rightarrow +105$	4.2	1.26–1.51	$\pm 0.97$	8.6	ESA ESTEC Report 2024
TR 组件 C (SiGe BiCMOS)	24–29.5	$-40 \leftrightarrow +85$	1.8	1.41–1.63	$\pm 1.35$	22.7	IEEE RFIC Symp. 2024
TR 组件 D (GaN/SiC)	3.3–3.8	$-55 \rightarrow +125$	3.0	1.28–1.55	$\pm 0.75$	10.2	IMS Proc. 2024
TR 组件 E (SOI CMOS)	0.7–1.0	$-40 \rightarrow +85$	1.5	1.35–1.60	$\pm 1.20$	18.5	EuMW Proc. 2024

## 3 射频性能稳定性测试方法体系

### 3.1 温度循环应力下的性能漂移测试

温度循环应力测试构成评估 TR 组件射频性能稳定性的重点环节，该测试方法模拟器件在实际服役环境中经历的极端温度交变条件，意在显示其核心电学参数随温度周期性变化的漂移规律，测试过程一般依据 GJB 548B-2005 或类似标准设计严酷的温度剖面，将待测 TR 组件置于高低温试验箱内，让它在规定的上限温度跟下限温度之间实行多次循环，每个循环包含升温、高温保持、降温及低温保持等阶段，温度变化速率与驻留时间均需精确控制，在循环的特定节点，譬如高温跟低温的稳定阶段，需使用矢量网络分析仪等精密仪器原位测量组件的插入损耗、增益、噪声系数及输出功率等射频性能参数，此类测量数据构成性能漂移分析的原始依据，借助记录并分析多个循环周期内各参数的变化轨迹，研究人员可以量化性能漂移的幅度与趋势，进而辨识出参数对温度应力敏感的薄弱环节，这样的测试不光暴露材料热膨胀系数不匹配引发的连接可靠性问题，也显示半导体有源器件阈值电压、跨导等参数的温度依赖性，为后续的失效机理分

析与可靠性建模给予不能缺少的实验数据支撑。

### 3.2 长期通断工作条件下的参数退化监测

长期通断工作条件模拟了 TR 组件在实际应用中反复开关机的严苛工况，这一种周期性应力会诱发材料疲劳跟界面退化等潜在失效机制，参数退化监测需要建立一套包含静态与动态指标的完整体系，监测对象应包含输出功率、增益平坦度、噪声系数以及端口驻波比等核心射频参数，这一些参数的漂移轨迹可以显示组件内部半导体器件老化、互连焊点裂纹扩展以及封装气密性下降等微观物理过程，测试方法使用加速寿命试验的原理，在实验室环境中施加高于常规使用频次的通断循环，同时保持对上述参数的连续或周期性采样记录，数据采集系统需要具备高精度跟高时间分辨率的特点，方便捕捉参数在通断瞬态及稳态保持阶段的细微变化，退化模型依据采集到的时间序列数据建立，分析参数退化速率与通断循环次数之间的关联，进而外推组件在额定工作条件下的长期稳定性跟使用寿命，这一类监测方针为评估 TR 组件在间歇性工作形式下的可靠性给出了定量依据，使得设计人员可以识别薄弱环节并改良其耐久性设计<sup>[2]</sup>。

## 4 可靠性评估模型构建

### 4.1 基于失效物理的退化路径建模

TR 组件射频性能的退化过程遵循着特定的物理规律，失效物理模型为描述这样的退化给予了理论框架，该模型将微观材料损伤与宏观性能衰减联系起来，借助分析半导体结温波动、互连金属电迁移以及介质层电荷陷阱等重点失效机理，建立出性能参数随时间或应力条件变化的数学关系，这样的关系一般表现为一种非线性的退化途径。依据失效物理的建模关键在于识别主导退化形式，譬如在高温高功率循环应力下，芯片键合界面的热疲劳裂纹扩展可能变成主要失效驱动因素，其裂纹扩展速率遵循 Paris 定律，跟温度循环范围以及功率脉冲宽度直接相关，由此可以推导出插入损耗或输出功率的退化轨迹方程<sup>[3]</sup>。模型建立需要整合多物理场仿真数据跟加速寿命试验结果，利用有限元分析计算关键部位的热应力分布，融合 Arrhenius 方程描述温度对失效速率的影响，同时引入功率律模型刻画电应力作用，最终形成可以预测特定工作剖面下性能退化程度的融合模型，该模型参数凭借贝叶斯方法利用现场退化数据持续更新，继而实现对 TR 组件剩余寿命的概率性评估<sup>[4]</sup>。

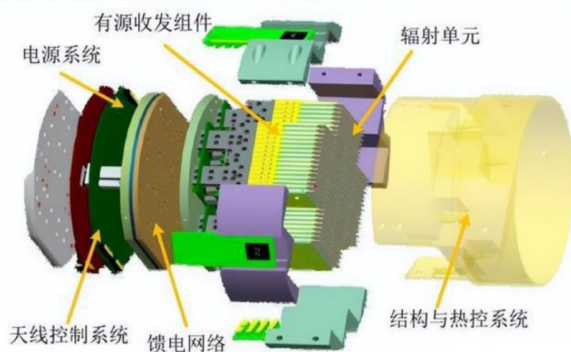


图 1 为 TR 组件拆解模型示意图

### 4.2 多应力耦合作用下的寿命预测方法

多应力耦合作用下的寿命预测方法建立需要突破单一应力模型的局限，射频性能稳定性受到温度循环、振动冲击与电应力等多场耦合效应的冗杂影响，该方法整合了加速退化试验数据跟物理失效机理，凭借建立多应力加速模型描述应力交互作用对 TR 组件核心性能参数退化轨迹的协同影响，应力耦合因子被引入传统阿伦尼斯或逆幂律模型以量化非单一应力贡献，依据竞争失效理论建立的可靠性评估框架可以识别主导失效形式并预测其演化途径，蒙特卡洛仿真模拟多应力随机加载过程然后评估寿命分布特征，该方法为高可靠性 TR 组件的设计裕度验证与服役寿命评估给出了量化工具。

### 4.3 性能裕度与可靠性阈值关联分析

性能裕度跟可靠性阈值的关联分析构成了评估模型的重点环节，该分析目的是显示射频性能参数的设计冗余与系统长期稳定运行之间的定量关系，性能裕度一般定义为核心参数实测值相对于其设计规范下限的差值，这一类差值折射了组件在初始状态下的安全边界，而可靠性阈值则代表了参数在寿命周期内不发生功能失效的临界值，两者之间的动态映射关系需要借助加速寿命试验跟长期监测数据实行实证建立，关联分析的过程需要将性能参数的退化轨迹与裕度消耗速率实行拟合，继而预测当裕度耗尽时组件是否已触及不可接受的失效风险阈值，这一种分析可以为设计阶段的裕度分配给予直接依据，使得工程师可以在成本与可靠性之间寻求最优平衡，而非仅仅依赖经验性的安全系数，建立的关联模型最终将性能裕度的量化指标转化为对剩余使用寿命的概率预测，为 TR 组件的视情维护跟健康管理打下坚实的理论基础<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

TR 组件射频性能稳定性由增益、输出功率、相位一致性、噪声系数、驻波比与带内平坦度六大参数协同表征，其退化行为表现明显非线性特征，衰减拐点清晰可辨，退化速率在生命周期前后阶段差异突出；温度循环应力测试显示材料热膨胀失配与半导体参数温漂是插入损耗漂移的主因，长期通断工作测试证实焊点微裂纹扩展跟器件老化共同驱动输出功率持续衰减，高功率负载冲击测试则量化出相位恢复时间超过 20 ms 即致使实时通信功能失效的核心边界；可靠性评估模型深度融合 Paris 定律描述的键合界面热疲劳、Arrhenius- 功率律耦合的多场加速机制及贝叶斯动态更新框架，将性能裕度消耗速率跟剩余寿命概率分布直接关联，使设计阶段的裕度分配、制造过程的质量判据与服役阶段的健康管理均获得可工程落地的量化支撑。

### 参考文献

- [1] 施梦侨,戴雷,李航,等.基于HTCC工艺的三维堆叠微波组件陶瓷外壳[J].固体电子学研究与进展,2025,45(06):113.
- [2] 付毅,郭雯静,刘思浩,等.用于射频能量收集的织物基整流器制备及性能优化[J].产业用纺织品,2025,43(10):1-7.
- [3] 陆平,任卫森.宽带低成本低成本本振变频组件的设计[J].微波学报,2025,41(06):104-108.
- [4] 贾盼明,何军,张强,等.基于共面波导的高功率吸收装置的设计及应用[J].环境技术,2025,43(11):83-90.
- [5] Kumar, Sunil, and Anil Kumar. 'Enhancing Solder Joint Fatigue Life in a Radar Transmit/Receive Module via Vibration Reduction using a Particle Damper in the PCB Enclosure.' IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology (2025).

# Research on the Rerouting and Efficiency Enhancement of Human Resources and Social Security Service Processes through Digital Transformation

Sheng Zhang

Quancheng County Human Resources and Social Security Bureau, Heze, Shandong, 274608, China

## Abstract

Digital technology has rapidly permeated the field of public governance, providing a driving force for the process reengineering of social security and social insurance government services. This study is based on the background of digital transformation and conducts analysis around the structural characteristics, bottleneck links, and collaborative mechanisms of social security government service processes. It proposes a process reengineering path centered on data-driven, platform support, and intelligent empowerment. On the basis of discussing process simplification, chain compression, and business integration, it further clarifies the promotion mechanism of digital transformation on service efficiency, including improvements in processing quality, acceleration of response speed, and reduction of operating costs. The research aims to reveal the internal logic of digital technology driving process reconfiguration, and provides a theoretical basis for building a precise, efficient, and sustainable social security and social insurance government service system.

## Keywords

Digital transformation; Social security service administration; Process reengineering; Efficiency improvement; Data governance

## 基于数字化转型的人社社保政务流程再造与效能提升研究

张胜

鄄城县人力资源和社会保障局, 中国·山东 菏泽 274608

## 摘要

数字化技术迅速渗透公共治理领域, 为人社社保政务服务的流程再造提供了动力来源。本研究立足数字化转型背景, 围绕社保政务流程的结构特征、瓶颈环节与协同机制开展分析, 并提出以数据驱动、平台支撑与智能赋能为核心的流程再造路径。在探讨流程简化、链条压缩与业务集成的基础上, 进一步阐明数字化转型对服务效能的促进机制, 包括办理质量提升、响应速度加快以及运行成本降低等方面。研究旨在揭示数字化驱动流程重塑的内在逻辑, 为构建精准、高效、可持续的人社社保政务服务体系提供理论依据。

## 关键词

数字化转型; 社保政务服务; 流程再造; 效能提升; 数据治理

## 1 引言

数字化浪潮深刻改变公共服务的组织方式, 也促使传统社保业务模式面临结构性调整压力。在此背景下, 社保政务服务的流程体系亟需以数字化思维重新塑形, 使信息流、业务流与数据流实现高度贯通。随着数据驱动治理、智能协同技术与在线服务平台的快速发展, 流程再造不仅成为优化服务体验的关键杠杆, 更是提升治理效能的重要动能。围绕流程如何被重构、效能如何被激活的探讨, 有助于揭示数字化赋能社保服务的运行机制, 为进一步理解制度创新与技术变革之间的互动关系奠定基础。

## 2 数字化转型驱动下社保政务流程瓶颈的识别

数字化浪潮不断推动公共服务结构发生深层变化, 人社社保政务流程在这一过程中暴露出诸多长期存在但被传统模式掩盖的结构性瓶颈。业务链条的分散化是重要表现之一, 大量社保经办事项在部门之间以线下材料传递与人工审核为主要形式, 导致流程协同效率受限。信息系统之间接口不统一、数据标准不一致, 使业务办理在不同环节存在重复采集与交叉核验, 形成高成本的“数据孤岛”运行方式<sup>[1]</sup>。办事主体在跨部门、跨层级业务中往往面临规则分割、信息不透明等问题, 进一步放大了流程的复杂度。随着服务需求

不断增长,传统流程的结构负担逐渐加重,流程阻滞现象愈加明显。

在人社业务向线上迁移的过程中,数字化能力不足的矛盾也逐步显现。许多社保政务系统在早期建设阶段以满足单一业务为核心目标,技术架构呈现割裂状态,难以适配当前对高并发访问、统一身份认证与数据共享的要求。信息资源的开放程度不高,使数据难以在部门间形成实时链接,业务流程中仍保留大量人工流转节点。人工窗口与线上系统并行运行时,又可能因规则解释差异与数据口径不一致导致办理结果出现偏差,削弱了流程稳定性。部分地区在数字化建设中投入不足,运维能力有限,也使系统难以承载流程再造所需的复杂协同任务。面对多层次业务的日益增长需求,这些技术层面与管理层面的问题共同限制了流程优化的空间。

围绕参保登记、待遇核定、资格认证、关系转移等核心业务领域,还能观察到流程内部的逻辑链条存在结构性错位。业务规则的制定与系统功能迭代往往缺乏同步性,使流程设计与实际运行之间形成间隙,加大了办理难度。部分环节的风险控制机制偏向事后补救而非前置预判,从而产生不必要的审核量,拖慢整体办理节奏。信息核验机制缺乏跨区域统一标准,导致数据比对结果的准确度不足,进一步降低流程可靠性。随着数字化模式下服务需求的即时化趋势不断增强,传统流程的响应速度、准确性与可持续性难以满足现实治理场景的要求。流程瓶颈的存在不仅造成办事效率下降,也限制了数字化工具在治理体系中的潜在效能,为后续的流程重塑提出了更加紧迫的改革需求。

### 3 技术赋能推动社保流程重构因素分析

数字技术不断渗透公共服务体系,使社保政务流程具备被深度重构的条件。数据治理能力的提升,使分散的业务信息得以在统一标准下进行结构化整合,数据清洗、归集与建模能力的增强,使原本依赖人工判断的环节能够以算法规则实现自动识别与分类。通过数据接口标准化建设,多源数据在更高的频率下实现共享与联通,为流程的动态调整提供可量化依据<sup>[2]</sup>。随着数据资产逐步成为治理资源的重要组成部分,社保业务中的缴费记录、待遇计算、人员身份属性等核心要素能够以可追溯的方式在系统内部流转,使流程重构具备坚实的数据基础。

智能化技术的广泛应用,使流程重构获得新的方法支撑。人工智能在文本识别、风险识别和模式分析中的应用,使业务审核从经验式判断转向规则化筛查,进一步提升办理精准度与响应速度。知识图谱能够将政策条款、经办规则与场景化需求链接起来,为复杂业务提供智能匹配能力,减少规则理解偏差。流程机器人通过自动执行重复性强的事务处理任务,使业务链条中的人工操作量大幅减少。智能核验模型在风险防控领域发挥重要作用,可通过对历史数据和异常特征的分析,及时发现潜在违规行为,有助于构建更具稳定

性的流程体系。技术介入的深度增加,使流程重构从表层优化迈向机制重塑,推动人社业务模式迈向结构化、自动化方向。

### 4 社保政务流程再造的系统路径设计

社保政务流程再造的推进,需要以整体性治理理念为基础构建系统路径,使流程设计能够突破部门分割,实现业务链条的深度融合。围绕数据、规则与业务的统一协调,流程再造的首要环节在于建立贯通式的数据治理体系,通过数据资源目录、共享接口规范、数据质量控制机制等制度化安排,使各类业务数据具备一致性、可调用性与可追溯性<sup>[3]</sup>。数据驱动方式的引入,使流程重塑能够从精细化掌握业务运行状态入手,对高频事项、堵点环节和关键节点进行精准识别,从而形成基于真实需求的流程结构调整方案。在这一过程中,业务流程的逻辑链条被重新梳理,冗余环节得以被压缩,流程执行路径逐渐向电子化、集成化方向收敛。

在流程重构中,规则体系的结构化表达是实现自动化处理的重要前提。政策条款与业务规程需通过规则引擎、知识模型和结构化编码方式实现数字化表达,使系统能够对办理条件、限制因素和处理路径进行自动解析。随着规则框架逐步清晰,流程中的审核、比对与决策环节能够由算法模型执行,大幅减少人工判断的主观差异。对于复杂事项,可通过场景化规则组合构建可配置式办事链条,使流程设计具备柔性扩展能力,以适应政策变化和人口结构演变带来的新型业务需求。通过对规则的动态更新机制建立自动同步功能,使流程再造成果能够持续保持有效性,避免因规则滞后导致流程断裂。规则体系的数字化构建,使流程再造不再停留于表层修改,而是转向机制层面的深度重塑。

在系统路径的最终落地阶段,平台化与智能化的融合成为推动流程再造全面生效的关键驱动。通过建设统一服务平台,将身份认证、电子证照、材料调取、风险核验等功能模块系统化嵌入流程结构,使业务主体能够在单一入口完成跨部门协同事项。流程编排工具的应用,使各业务节点以可视化方式组合与调度,提升流程运行的透明度与调整灵活性。随着智能分析模型在服务环节中的应用不断深化,办理行为轨迹、需求变化趋势和业务负荷情况能够被实时捕捉,为流程优化提供持续反馈来源。移动端服务的集成,使办理场景延伸到多终端与多空间,实现流程设计向场景化治理迈进。通过这一系列系统路径的构建,流程再造形成技术、规则与业务相互支撑的完整体系,使社保政务服务具备更高层次的协同性、精准性与智能化水平。

### 5 流程再造实施中的效能提升机制探讨

流程再造的推进使社保政务服务的运行模式逐渐从线性作业向智能协同转变,在这一过程中效能提升机制主要体现在数据驱动带来的动态优化能力。随着数据采集、清洗与标注体系的完善,业务流转过程中的关键指标能够被实时记

录与分析,系统能够基于运行状态自动识别拥堵节点、异常行为与资源分布不均的问题。通过数据决策模型的嵌入,流程可在高频事项上形成自动调整机制,使资源配置更加贴近办理需求的变化趋势<sup>[4]</sup>。随着数据闭环结构的形成,业务办理时间、错误率与系统负荷等指标以可量化方式反映在流程调度逻辑中,使效能提升具备持续性与可迭代性。数据驱动能力的增强,使流程再造后的治理模式具备更强的精确性和响应速度。

在技术体系的支持下,自动化工具与智能审核机制成为提升效能的重要动力。流程机器人在重复性任务处理中的应用,使大量基础性事务能够在高准确度下实现自动执行,从而降低人工投入压力,提高业务流转速度。风险识别模型在核验环节中的应用,使潜在违规风险能够在前置阶段得到筛查,使审核链条的负担大幅减轻。通过对画像模型的运用,系统能够根据参保对象的属性与行为特征自动匹配办理流程,使服务路径更加贴合个体需求。智能推荐机制在材料调取与规则解释环节中提供实时支持,使业务主体在操作过程中减少误差,提高办件的规范化水平。随着技术深度不断提升,流程内部的自动响应能力全面增强,使效能提升呈现出结构化扩散的趋势。

跨部门协同平台的构建,使效能提升机制在组织层面得到进一步强化。统一身份体系的形成,使不同业务系统能够在统一认证框架下实现无缝衔接,减少重复验证造成的延误。电子证照库与档案共享系统的全面应用,使材料提交环节的人工交互大幅减少,流程链条趋于简化。通过流程编排引擎,各部门的规则逻辑能够在系统内部实现同步更新,使协调整体具备稳定性与可控性。业务状态的实时同步,使办理行为在各节点间实现透明化,减少信息滞后导致的反复沟通现象。随着协同效率的增强,流程运行的整体效能随之提升,使再造成果能够在治理结构中形成稳定的制度化支撑,为社保政务服务提供更加顺畅的运行基础。

## 6 数字化重塑社保政务服务的整体成效归纳

数字化对社保政务服务体系的重塑,使流程再造在运行效率、治理方式与服务体验等层面展现出显著成效。随着数据治理体系的完善,业务链条的透明度与可控性得到显著提升,流程中长期存在的信息壁垒逐步被打破,业务数据能够在统一规范下实现高效流动<sup>[5]</sup>。经由数字化工具的嵌入,办理环节中的人工依赖度降低,使流程结构更为紧凑,业务响应速度明显加快。服务对象在跨区域和跨部门事项中获得

更稳定、更便捷的办理体验,整体服务体系的运行连贯性得到增强。

在治理结构层面,数字化推动的流程重塑使协同机制呈现系统化特征。跨部门业务平台的搭建,使事项办理在组织内部形成闭环式运行模式,信息校验、材料调取与规则解析能够在系统内部自动流转,大幅减少人为交互造成的流程阻滞。智能化核验体系的构建,使风险识别更加前置化、自动化,治理成本显著下降。政策规则通过数字化表达得以快速落地,使制度执行的准确度与一致性得到强化。伴随技术体系的成熟,社保业务在政策变动时期的响应能力显著提升,治理体系更加具备结构韧性。

流程再造的持续深化,使社保政务服务呈现从单点突破向整体优化的扩展趋势。移动端服务的普及,使办理场景不再受空间限制,服务触达率和服务公平性得到明显改善。数字档案、电子证照和统一身份体系的融合,使服务流程形成多端一致的体验模式,推动线上线下深度融合。通过流程运行数据的长期积累,治理模式逐渐从经验驱动转向模型驱动,使服务优化具备持续迭代的能力。随着数字化结构在治理体系中的深入渗透,社保政务服务在精准性、稳定性与智能化水平上呈现出系统化跃升,使流程再造的长期价值不断显现。

## 7 结语

数字化转型促使社保政务服务的流程体系在结构、技术与治理模式上发生深刻变革,流程再造的实践不断推动业务链条向集成化与智能化方向演进。数据驱动、规则结构化和平台协同的持续强化,使服务效率、治理精度和办事体验均呈现稳定提升态势。随着技术体系与制度框架的进一步融合,社保政务服务的运行模式将持续保持优化动力,为公共服务体系的高质量发展奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] 郑东波,邵嘉铭,李朝晖,等. 数字精益赋能企业数字化转型的思考与实践[J]. 智能制造,2025,(06):86-92.
- [2] 肖霞. 数字化转型背景下企业全面预算管理的创新路径研究[J]. 中国会展(中国会议),2025,(24):116-118.
- [3] 唐咏仪. 数字化转型对企业海外投资效率的影响研究[D]. 南京邮电大学,2024.
- [4] 张国平. 推进数字化转型发展全面提升社保卡服务效能[N]. 精神文明报,2025-02-20(B02).
- [5] 芮跃峰. 数字化转型中公共服务平台化供给机制研究[D]. 华中科技大学,2023.

# Design and Implementation of Intelligent Control System for Railway Train Operation from the Perspective of System Engineering

Xiaobin Jiang

Henan Thinker Information Technology Co.,Ltd., Zhengzhou, Henan, 450001, China

## Abstract

With the continuous expansion of high-speed rail and heavy-haul train operations in China, existing railway train control systems have demonstrated limitations due to inefficient information exchange and poor coordination, failing to meet comprehensive standards for safe, efficient, and intelligent operations. This study employs systems science theory and methodology, following a structured approach of “theoretical foundation, requirement analysis, overall design, modular development, and testing verification,” to conduct theoretical analysis of intelligent electronic control systems for railway trains. It precisely defines system functionalities and performance parameters, establishing a four-tier architecture of “sensing-control-execution-human-machine interaction” with six functional modules. By integrating cutting-edge technologies such as BeiDou Navigation, 5G networks, and artificial intelligence, the system achieves modular integration and rigorous testing validation, ultimately serving as a robust technical backbone for railway transportation.

## Keywords

Systems engineering; Railway train; Intelligent electronic control; System design; Operational safety

## 系统工程视角下铁路列车运行智能控制系统设计与实现

姜小彬

河南思维信息技术有限公司, 中国·河南郑州 450001

## 摘要

我国高速铁路与重载列车运营里程持续攀升, 铁路列车运行控制系统因信息交互不畅、协同性差而显弊端, 难以达到安全、高效、智能运行的综合标准。本探讨依托系统科学理论与方法论, 依照“理论根基、需求剖析、总体设计、模块化开发、测试检验”路径, 实施铁路列车智能电子控制系统的理论分析。精准描述系统功能与性能参数, 形成“感知-控制-执行-人机交互”四重架构及六大功能单元, 采用北斗导航、5G网络、人工智能等前沿技术, 实现模块化组合, 测试验证系统达标水平, 成为铁路运输技术支撑的坚实后盾。

## 关键词

系统工程; 铁路列车; 智能电子控制; 系统设计; 运行安全

## 1 引言

随着国内铁路行业快速发展的步伐, 我国高速列车、重载列车的运营里程不断攀升, 这对列车运行的安全性、高效性以及智能化水平设定了更高的要求<sup>[1]</sup>。传统的铁路列车运行控制系统大多采用分散式的设计思路, 各项功能模块独立运作, 暴露出信息交互不通、协同控制能力薄弱、故障响应迟缓等弊端, 难以匹配复杂路网场景下的列车运行需求。本文从系统工程的角度开展相关探讨, 整体按照“理论基础、需求分析、总体设计、分模块实现、测试验证”的顺序开展,

【作者简介】姜小彬(1985—), 男, 中国河南浚县人, 初级工程师, 本科, 从事铁路调车安全防护系统研究。

开展铁路列车运行智能电子控制系统的设计与实现研究, 为当代铁路运输筑牢可靠的技术根基。

## 2 相关理论基础

### 2.1 系统工程理论与方法论

近年来, 随着智能交通技术的迅速进步, 传统铁路建设及运营正在加速推进智能化和数字化转型。在高速铁路领域, 基于实际工程勘察设计数据驱动建模, 将显著提升列车在复杂运行环境中的仿真运行精确度, 同时, 随着智能交通调度系统的持续完善, 智能调度中心实现对列车群运行状态的监控与管理, 提高了安全性和运营效率。这一创新技术为数字铁路建设注入了新的活力, 有助于构建更加智能、高效的铁路运输体系, 推动铁路行业的高质量发展<sup>[2]</sup>。

## 2.2 铁路智能电子控制核心技术

要实现这套系统，铁路智能电子控制核心技术是不可或缺的基础。结合当下铁路智能化的发展走向，核心内容为列车定位与导航相关技术，采用北斗卫星导航、惯性导航、轨道电路定位等多种方式融合，实现列车位置的精准定位，可实现米级的定位精度，以适配列车运行管控要求<sup>[9]</sup>。

## 2.3 铁路控制系统安全标准

铁路列车运行控制系统直接关乎人民群众的生命与财产安全，为严格遵循安全方面的标准要求，国内铁路控制系统的安全标准大多参考国际电工委员会的相关规范，结合我国铁路的现实情况进行制定，其核心组成有 IEC 61508 功能安全标准以及 IEC 62280 等标准。

## 2.4 系统工程与铁路智能控制融合应用

系统工程与铁路智能控制的结合，本质上是将系统工程的方法论贯穿于铁路智能控制系统的全生命周期，对系统进行整体层面的优化。在开展设计工作的阶段，依托系统分析流程，明确本系统的整体目标，对感知、控制、执行、交互等各类模块的功能进行统筹，避免模块单独设计造成的协作不顺；在推进实现的阶段，按照层次性的要求，把系统拆分成多个层级，把各层次的接口关系梳理清楚，推动各模块实现协同运转；在运维开展阶段，围绕动态性原则进行相关操作，对系统运行情况开展实时监测，随环境调整并匹配运行需求，针对系统实施优化升级举措，使系统始终处在最佳运行水准。

## 3 铁路智能电子控制系统需求分析

以系统工程的整体性与最优化原则为依据开展工作。我们进行需求分析要紧扣针对性、可行性、安全性、扩展性这四大核心原则：铁路列车运行控制的核心需求是针对性原则的聚焦点，要消弭传统系统的现存痛点；紧扣可行性原则，贴合当前技术条件与铁路运输实际，让需求具备实际落地的可行性；保障列车运行安全是安全性原则的首要目标，所有需求设计都应达到相关安全标准的要求；为扩展性原则预留接口，为未来铁路的智能化升级以及路网扩展提供保障。

## 4 基于系统工程的系统总体设计

### 4.1 总体设计原则与目标

务必要恪守整体性、层次性、最优化及动态性原则，适配铁路列车运行控制相关要求，落实“安全优先、智能高效、协同兼容、可扩展”的设计核心原则，将系统安全性置于各项工作的首位，全部设计方案都契合相关安全标准；整合前沿技术，实现智能决策与高效运转；让系统各模块实现协同工作，可与现行铁路系统设备相匹配；适配未来技术更新与路网延伸需求。

### 4.2 系统总体架构设计

依据系统工程的层次性原则开展相关工作，铁路列车运行控制系统的整体架构，被划分成了四个相互关联且协同

运作的层级，组成一个有机的统一整体。感知层承担数据采集的源头功能，利用车载传感器、轨道及气象监测设备等手段，先对列车运行状态、轨道环境等多元数据开展初步处理，再传输至控制层。控制层作为整体运作中的核心决策中心，实施智能分析操作，把生成指令下达给执行团队。实现与外部系统以及人机交互层之间的数据互通。

### 4.3 功能模块划分与接口设计

从系统整体架构与功能需求出发，可将系统划分为六大职责明确的功能模块，且各模块协同开展工作。对多源数据进行采集与初步处理是感知模块的任务；智能决策模块就数据展开深度剖析，实现故障预警与调度优化；控制模块根据决策得出的结论，发出速度调节及制动类的具体指令；执行单元将驱动牵引及制动设备完成指令相关操作。

### 4.4 系统安全性与可靠性设计

符合 SIL4 级安全完整性相关要求，采取冗余设计策略，对核心模块实施双备份操作，确保单一模块故障时，可快速切换备用模块，不会对系统运行造成干扰；采用数据加密的相关技术，对采集得到的数据以及传输的指令开展加密操作，做好信息泄露与篡改的防范；完成故障自诊断模块的配置，动态跟踪系统各模块的运行状态，第一时间识别故障并发送预警，另外附带故障的处理建议。切实恪守铁路控制系统的安全准则，针对系统设计、实现与测试等流程开展安全管控工作，保障系统运行的安全性。

### 4.5 关键技术选型

结合系统的实际需求以及预先设定的设计目标，贴合当前技术发展状况进行关键技术挑选。就感知层面而言，用到了北斗卫星导航系统、高精度车载惯性导航传感器、轨道振动传感器及高清视频监控设备，完成列车位置与运行状态的精准感知工作。数据传输采用的是 5G 和光纤混合组网技术，车地之间的实时通信依靠 5G 完成，保障地面系统之间实现大带宽稳定传输。

## 5 系统分模块设计与实现

### 5.1 感知层设计与实现

车载感应模块部署于列车核心部位，综合运用惯性导航、速度、加速度及制动状态等多元传感器技术，即时搜集列车速度、加速度、制动幅度及精确定位等核心运行参数；感应模块沿轨道边缘分散配置，配置轨道振动探测装置、轨道磨损监测器及异物侵入限制检测仪，实时跟踪轨道的平滑度、磨损状况及异物侵入现象；将气象监测终端与高清视频监控设备结合，形成环境感知单元，动态搜集并整理降水量、能见度、风速等气象参数以及轨道周边人员、车辆、障碍等环境资料。感知层采用模块化设计理念，众多感知工具经规范化端口与数据收集单元实现无缝融合，核心改进焦点为融入 AI 边缘计算技术单元，摒弃传统单一滤波降噪流程。通过轻量级卷积神经网络对采集数据实施即时解析，自动筛选

异常数据点,执行数据净化、属性提取及初步区分,大幅提高数据筛选的精确度与效率,高效数据借助5G传输模块实现快速处理与高效流通,同步接入调控中心,实施多源数据整合、智能预加工与高效传输措施,为智能决策提供稳固的数据后盾,保证数据实时获取、精确可靠。

## 5.2 控制层设计与实现

控制层当之无愧地采用“PLC+AI智能”的双核控制架构,实现了从传统控制模式向智能化转型的重大突破,感知层预处理的数据流至该层,由数据处理模块接收,采用Transformer模型的AI数据整合策略,对车载、轨道、环境三大类数据实施深度汇聚,细致筛选列车运行状况、轨道状况与环境风险等关键资讯,全面提升智能决策的支撑水平。智能决策系统的核心构建模块是大数据与深度学习模型的结合,本文采用融合注意力机制的LSTM神经网络进行实验,对制动系统等核心组件实施时间序列分析,精确识别潜在故障苗头,可在30至60分钟内发布分级警报并自动发送定位信息;结合强化学习机制、实时路况及人流量分析,动态调整调度模型,结合AI应急决策模型,迅速形成最适处理方案。

## 5.3 执行层设计与实现

执行层是命令实施的核心阶段,采用AI自适应控制手段,精确执行控制指令并实现灵活调整,突破传统执行模块的被动应对格局。在控制层下达牵引指令时,AI技术赋能牵引模块,采用速度闭环控制算法,即时呈现列车速度与预定速度的误差,自动校正牵引系统的动力输出模式,改进牵引力分配手段,实现列车速度的持续上升与精确控制,节能与乘坐舒适度同步提升。制动模块启动作业,采用AI驱动的制动算法优化,融合列车实时速度、承载能力、轨道坡向等数据,智能化调节制动压力及制动触发时刻,消除急速制动、剧烈振动等不良后果,保障列车匀速减速或静止,全力提升行车安全水平;搭载AI健康管理系统的设备模块,实时监控转向架、空调、供电系统等辅助设施的运行参数,自动识别设备运行异常迹象,实施预防性维护警示,依据列车运行背景,自动调整设备运行参数,保证列车运行井然有序。

## 5.4 人机交互层设计与实现

人机交互层秉持“智能简易、精准迅速”的核心理念,整合AI交互技术潜力,提升驾驶人员操控体验的互动性,降低操作难度,列车操作室所采用的交互式终端,采用高清触控显示技术,采用人工智能数据图形化处理方法,对列车行驶情形、调度指令、故障报告、环境参数等繁杂资料,即时以图形、预警等直观手段呈现,便于驾驶者迅速把握核心信息概览。终端界面支持驾驶员手动输入操作指示,融入AI语音交互功能模块,通过语音指令,操作者可实现列车

速度调控、实施紧急制动及查询指令等,降低人工操作频次,提高作业效率;集成AI智能故障提示功能模块,系统出现故障情形时,除迅速实施声光警示以外,采用人工智能故障诊断机制,快速挖掘故障诱因、精确锁定故障区域,自动实施对应措施,指导驾驶人员迅速整治故障,简化故障排除的烦琐程度。

## 5.5 系统集成与测试验证

按照系统全面布局规划,对感知、控制、执行与人机交互层实施模块化集成,核心采用AI辅助调试算法,跨越模块接口兼容性鸿沟,推动各层级间无缝协作机制,确保数据传输无阻、指令执行精准无误。在组合实施阶段,对系统软硬件实施同步调试,采用人工智能故障分析机制,自动监控集成阶段出现的接口故障、数据传输不畅、指令执行误差等情形,推送排查指导手册,提升调试作业的效率。确保系统与实际应用相契合,实施系统测试的确认阶段,包含功能、性能及安全三大测试范畴:功能测试主要针对AI故障预警、智能调度、自适应控制等核心智能功能的有效性进行验证;AI技术模拟多种运行状况以检验系统性能水平,对系统数据处理效率、指令反应时长及协同作业的稳定性进行测试;列车行车安全是安全检验的核心焦点,核实AI在紧急应对、故障排除、安全保卫方面的稳定性能,维持系统运营安全需求。

## 6 结语

本文立足于系统工程的视角展开分析,贴合铁路列车运行控制的实际应用需要,开展了铁路列车运行智能电子控制系统的设计及实现相关研究,研究首先针对系统工程理论、铁路智能电子控制核心技术、安全标准,以及二者的融合应用展开梳理,为系统搭建工作筑牢理论根基;依托需求分析流程,厘清了系统的功能需求与非功能需求,作为系统设计环节的参考凭据;按照系统工程的层次性与整体性相关原则,完成了系统整体架构搭建与各模块的设计工作,对各层次、各模块的功能和接口关联进行了明确说明;项目最后环节为系统集成及测试验证,论证了该系统既有效又具备可行性。

## 参考文献

- [1] 李博,张新,王岩.高铁列车运行图智能编制技术方案研究[J].铁路技术创新,2025,(03):163-171.
- [2] 罗大勇.铁路列车安全运行管控平台建设的思考[J].大众标准化,2025,(11):64-66.
- [3] 李智,张涛,曾壹,王涛,许伟.400 km/h高速铁路CTC系统列车运行智能调整研究[J].中国铁路,2025,(06):139-145.

# Intelligent Application of UAV Aerial Photography in Bridge Detection Driven by Deep Learning

Yingbin Huang

Fujian Provincial Construction Group Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361003, China

## Abstract

With the continuous increase in the number of highway bridges and culverts in China and their extended service life, these structures are prone to developing issues such as cracks, exposed reinforcement, and surface peeling due to environmental and load factors during operation. Traditional manual inspection methods face challenges including high-altitude hazards, low efficiency, high missed detection rates, and non-standardized data processing. In contrast, drone aerial photography offers significant advantages like non-contact operation, wide coverage, and high resolution. Deep learning for drone aerial imagery serves as the core functional module for intelligent image inspection. This study establishes a technical framework for drone image acquisition and deep learning-based damage detection, improves the fusion model of YOLOv8s-seg and U-Net, and achieves refined identification, classification, and quantitative assessment of bridge defects. By integrating this model with 3D imaging, the system enables precise 3D localization of damages, forming a comprehensive intelligent inspection solution for damage identification.

## Keywords

UAV aerial photography; Deep learning; Bridge inspection; Damage identification; 3D modeling

# 深度学习驱动下无人机航拍影像在桥梁检测中的智能化应用

黄滢彬

福建省交建集团工程有限公司, 中国·福建 厦门 361003

## 摘要

我国公路桥涵数量持续增加、桥梁服役年限较长,在服役过程中,受环境及荷载等因素影响,桥梁易出现裂缝、露筋、脱皮等病害问题。传统人工检测存在高处作业危险性大、检测效率低、漏检率高、数据处理不规范等问题,而无人机航拍具有非接触、覆盖广、分辨率高等显著优势,无人机航摄深度学习则是航摄图像智能检测的核心功能模块。本文构建无人机航摄图像采集与深度学习病害检测技术体系,改进YOLOv8s-seg与U-Net融合模型,实现对桥梁病害的精细化识别、分类与定量检测;并将该模型与三维影像模型融合,实现对病害的精确三维定位,形成病害智能识别全流程检测方案。

## 关键词

无人机航拍;深度学习;桥梁检测;病害识别;三维建模

## 1 引言

智能技术的发展已经进入具有深度学习、跨界融合、人机协同、群智开发及自主操控等特性的新阶段,智能技术的快速更迭为铁路行业的发展注入新活力。交通安全是交通基础设施建设的重要组成部分,桥梁结构的安全性将直接影响交通运行及行人通行安全。桥梁在运营过程中,因混凝土老化、钢筋锈蚀、汽车荷载作用等因素,易产生各类病害。传统检测方式中,检测人员借助登高设备,通过目视观察法

【基金项目】福建省住房和城乡建设厅科技计划项目(项目编号:2025-K-135)。

【作者简介】黄滢彬(1979—),男,中国福建漳州人,本科,副高,从事市政路桥研究。

对桥梁底面、主缆等部位进行检测,该人工主观检测方式的检测结果无法有效留存。而无人机检测结合深度学习的技术手段,可对桥梁全位置、全范围开展检测,充分利用桥梁的检测走行空间,助力桥梁体检工作,秉持安全为先的原则,推动桥梁检修向精细化、高效化、智慧化方向发展。

## 2 无人机航拍桥梁检测的技术基础与应用痛点

### 2.1 无人机航拍桥梁影像采集的技术特性

无人机摄影检测也被称为桥梁非接触式检测。搭载高清相机、激光雷达传感器、热成像传感器的工装大翼无人机,可对桥梁开展多视角全方位摄影测量,针对箱梁底面、桥墩顶面、主缆吊索等桥梁复杂部位,采用贴身摄影测量与倾斜摄影测量相结合的方式;针对远距离拍摄受限的区域,可调整拍摄距离完成影像采集,其0.1mm级的分辨率能够识别更小的早期裂缝病害,检测结果更直观可视。无人机配备的

北斗惯导定位系统精度可达厘米级,可有效规避GPS信号失灵、断线等问题,采集的影像具备位置性强、连续性好的特点,为后续深度学习提供优质的影像素材<sup>[1]</sup>。相较于传统检测设备,无人机检测可实现无车化作业,避免对路网交通造成影响,单次检测的覆盖范围可达人工检测的10倍。

## 2.2 传统桥梁检测模式的核心局限

传统桥梁检测主要采用目视检测、回弹检测、超声波检测等方式,存在诸多难以克服的弊端。检测过程中搭建高空脚手架、使用桥检车,不仅耗时费力,还存在坠桥的安全隐患,针对大跨径悬索桥、斜拉桥的主缆、桥塔开展检修时,该问题尤为突出<sup>[2]</sup>。人工检测的结果依赖检测人员的经验,易对细微裂缝、隐蔽露筋等病害产生漏检、误检;同时,检测结果缺乏统一的记录规范,未形成量化指标,无法明确病害的规模及发展趋势;且检测结果多以文字形式记录,难以开展多期检测结果的对比分析,无法精准把握病害的变化趋势,也无法在检测过程中同步掌握桥梁立体造型并锁定病害位置,进而导致养护施工难以实现精准对应检测,养护效率与养护水平均受到影响。

## 2.3 深度学习赋能桥梁检测的技术适配性

深度学习算法能够自主学习图像深度特征,适用于无人机航拍的场景需求。桥梁病害图像存在形态不规则、尺度参差不齐的特点,且检测现场的场景复杂,现有图像检测算法多依赖人工提取特征,难以实现复杂场景下的桥梁病害检测。卷积神经网络可针对裂缝、锈蚀、剥落等病害的纹理特征、边界特征进行自主学习,Transformer网络能够学习全局空间的场景特征,有效提升小目标病害的识别精度。

深度学习与无人机检测相结合,可实现对各类病害的自动分类分析,再结合边缘检测技术,能够在无人机端完成病害快速粗检,大幅节省数据处理时间。深度学习与无人机航拍技术的融合,可实现从无人机航摄影像取证到病害检测分析的全程智能化,打破传统病害检测的技术瓶颈,创新桥梁检测的技术思路。

# 3 深度学习驱动的无人机桥梁检测技术体系构建

## 3.1 桥梁航拍影像数据集构建与预处理技术

丰富且高质量的数据集是训练高性能深度学习模型的基础。本次研究结合实际检测场景中的桥梁病害情况,构建以裂缝、露筋、混凝土剥落、钢筋锈蚀、支座偏移5类常见病害为核心的数据集,影像素材以能够全面代表各类检测场景的无人机遥感影像为主,涵盖山区混凝土梁桥、城区简支梁桥、大跨径斜拉桥等桥型,以及晴天、阴天、逆光、侧光等光照条件,干燥、潮湿、轻微积尘等表面状态。研究共标注样本12000余张,按照7:2:1的比例切分训练集、验证集、测试集,保障数据集的均衡性与典型性。

对低照度图像进行直方图均衡化处理,滤除桥梁阴影、水渍对图像对比度的影响,消除航拍过程中因大气气流振动产生的椒盐噪声伪影,保留病害细节纹理;同时标注病害区域,生成像素级分割掩码和目标框,实现缺陷部位、缺陷类别、缺陷边界的多方位、多角度精准定位标注<sup>[3]</sup>。针对小样本病害数据集,采用旋转、翻转、亮度变换、随机剪裁等数据增强方式,提升数据集的丰富度与模型的泛化能力;建立数据集质检机制,采用算法初检结合人工剔除的方式,删除模糊、重叠、标注错误的影像,为后续模型训练的精度提供可靠的数据基础。

## 3.2 多任务融合的桥梁病害深度学习检测模型

针对桥梁检测的实际需求,本文设计融合YOLOv8s-seg与改进U-Net的桥梁病害深度学习模型,实现病害目标检测与语义分割双重任务。以YOLOv8s为模型的基础检测框架,拓展颈部特征融合结构,增强尺度特征信息的交互能力;引入坐标注意力机制,提升对微小裂缝、微小露筋等细粒度病害的识别能力;采用融入坐标注意力的损失函数(CEIoU),提升边框回归与分割边界框的精度,减少回归分割误差。针对线槽裂缝病害的精细化分割需求,对U-Net模型进行优化,引入残差连接防止深层网络的梯度消失问题,增强模型对细粒度线槽裂缝的连续分割能力;同时引入IoU损失函数,提升细粒度线槽边框提取的完整性与连续性。模型训练过程中,采用Lion优化器加速模型收敛,选择余弦退火函数调整模型学习率,并通过早停与权重衰减策略,避免模型过拟合。该融合模型对桥梁五类病害的平均识别精度可达98.8%,裂缝分割的IoU值为0.913,相较于原始YOLOv8s模型提升26%以上,基本满足工程实际的检测精度要求,能够将病害从桥梁表面的纹理、污渍等背景中有效分割出来。

## 3.3 病害量化与三维空间定位技术实现

在病害分割检测的基础上,通过像素尺寸换算实现病害量化分析,依据无人机航摄影像的像素比例,计算裂缝的长度、宽度,混凝土剥落的面积,钢筋锈蚀的范围等指标,并结合桥梁养护相关标准,自动判定病害的严重程度。采用无人机倾斜摄影测量模型,通过运动恢复结构算法对桥梁进行高精度三维模型重建,点云坐标精度可达毫米级,能够对桥梁的梁体、桥墩、支座、吊索等部位实现真实三维还原。通过特征点提取与投影反算技术,将二维照片中识别的所有病害映射至三维模型的工程坐标中,对各等级构件级病害进行精准定位,明确病害所在的梁段、墩台及具体坐标。对同一构件的多期检测结果进行对比分析,结合病害发展趋势,通过三维模型测算桥梁结构的沉降、位移等病害指标,为后续桥梁养护检修工作提供数据参考。该技术实现了病害的精准识别、量化分析、三维定位与溯源追踪,通过二维检测结果与三维模型的融合应用,提升了检测精度,为桥梁养护检

修、病害治理提供了科学依据。

## 4 智能化检测体系的工程应用与性能验证

### 4.1 典型桥梁智能化检测的全流程实施

本次研究以山区大跨径混凝土连续梁桥、城市小跨径简支梁桥为检测对象,以桥梁下箱梁底面、桥墩立面、支座节点、桥面铺装、伸缩缝为关键检测位置,进行无人机航线的自动规划与生成。无人机飞行高度设置在 5-15m 的合理范围内,航向重叠度 > 80%,旁向重叠度 > 70%,规避桥梁附属物对航摄的影响。无人机可自动记录桥梁全息影像数据集,通过高清相机、激光雷达完成全桥梁、全过程的扫描采集,采集的数据通过 5G 技术自动传输至云端平台进行转化处理。云端平台通过前端预处理模块对原始数据集进行数据增强、降噪、制式标准化等操作,剔除模糊、过曝、低像素的无效数据,以及桥梁附属物相关的无关数据。系统可根据检测结果自动生成规范性检测报告,对病害的位置、类别、尺寸、严重等级进行精准标记,并将病害信息与属性数据耦合至桥梁三维场景中,形成可视化、可交互的检测结果<sup>[4]</sup>。整个检测过程无需人工干预,单座中型桥梁的一次完整检测周期仅为 7 天,相较于传统人工检测大幅缩短了检测时间,既提升了检测效率,又有效规避了高空作业的安全风险。

### 4.2 检测模型的性能指标与工程适应性验证

以多座桥梁的实际检测结果为依据,选取准确率、召回率、F1 值、平均准确率和推理时长为评价指标,对模型综合性能进行验证。结果表明,模型对裂缝、露筋等细小病害的召回率为 0.914, F1 值为 0.913;对混凝土剥落、钢筋锈蚀、支座错位等病害的平均准确率可达 97% 以上;对桥梁表面阴影、水渍、油渍、青苔等背景区域的错检率低于 1.2%。在不同光照条件下,模型对晴天、阴天、逆光拍摄图像的识别精度均保持稳定,仅在阴天弱光照、逆光拍摄场景下,识别精度的降幅低于 3%,具备良好的环境适应性。同时,采用通道剪枝、量化压缩的方式对病害识别模型进行轻量化处理,轻量化后模型参数量为原模型的 60%,部署在无人机机载边缘计算模块后,单张图像的推理时长小于 50ms,满足现场实时检测、快速处置的需求。与人工检测相比,智能化检测方法的人工成本降低 92%,病害量化精度控制在 0.2mm 左右,结构位置定位精度控制在 5cm 左右,满足《公路桥梁技术状况评定标准》的相应工程指标要求,可替代人工开展桥梁日常检测与病害专项检测工作。

### 4.3 智能化检测对桥梁养护决策的支撑作用

基于深度学习的无人机桥梁检测平台,能够为桥梁养

护工作提供更完整、更具针对性的养护信息,推动桥梁养护模式从“修后养护”向“养修结合、精细化养护”转变。该平台可构建桥梁全寿命周期病害数据库,将多周期检测照片、检测数据、三维模型统一入库,通过纵向病害数据分析,掌握病害的发展速率与演化等级,提前预测桥梁裂缝扩展、钢筋有害腐蚀等问题,实现主动养护;并针对不同等级的病害提出精细化养护建议,对轻度病害区域制定周期性主动养护方案,对中度病害区域采取注浆、除锈、封缝等主动处置措施,对重度病害区域实施主动检查、结构加固等应急养护方案,实现养护资金的靶向使用<sup>[5]</sup>。

平台可接入当地交管部门的桥梁养护管理系统,实现病害信息的实时共享与分级推送,形成养护工作的闭环管理;养护人员可在三维模型上快速定位病害位置、查看病害数据,进而开展现场精准维修,大幅提升养护工作效率。工程实践表明,该智能化检测体系可使桥梁维护费用节省 30% 以上,有效降低病害对桥梁结构的影响,延长桥梁使用寿命,为交通安全稳定运行提供坚实的技术保障。

## 5 结语

无人机航拍与深度学习的融合应用,重构了桥梁检测技术体系,打破了传统桥梁检测在便捷性、安全性、准确性方面的局限。本研究通过自制专属数据集、构建并优化多任务融合深度模型、实现病害数据化与三维定位,形成了涵盖图像智能采集、数据智能处理、病害智能检测的全流程技术方案,经工程验证成效显著,具备广泛的应用价值,能够为更多桥梁工程的检测工作提供技术支撑,为桥梁预防性养护、健康状况评估奠定数据基础,为交通基础设施建设与养护工作提供数智化服务保障。在后续研究中,需进一步优化轻量化、小样本学习模型,拓展多模态数据的应用范围,持续提升模型在复杂场景下的检测稳定性,使其更好地支撑桥梁全生命周期的安全保障工作。

### 参考文献

- [1] 甘君,张崇斌,刘诗洋,等.基于无人机航拍的高铁长大桥梁施工场景小目标智能检测方法[J].中国铁路,2025,(08):15-29.
- [2] 王桔.无人机航拍技术在高速公路病害检测中的应用研究[J].运输经理世界,2025,(23):104-106.
- [3] 罗旭东,吴一全,陈金林.无人机航拍影像目标检测与语义分割的深度学习研究方法研究进展[J].航空学报,2024,45(06):241-270.
- [4] 付振宇,郭宇鹏,郑晓林.无人机在公路桥梁养护检测中的应用[J].中国设备工程,2023,(20):168-170.
- [5] 朱云飞.无人机影像在公路桥梁检测中的应用分析[J].建筑技术开发,2019,46(01):129-130.

# Application Research of Real-scene 3D and BIM Fusion in Intelligent Management of Road and Bridge Construction Based on Python Algorithm

Zhencheng Hu

Fujian Provincial Construction Group Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361000, China

## Abstract

To address industry pain points in traditional road and bridge construction management—including information asymmetry, low control precision, and delayed decision-making—this paper proposes an integrated 3D real-world modeling and BIM technology solution using Python algorithms, establishing an intelligent management system covering the entire construction lifecycle. The study first explains the core principles of BIM technology and 3D modeling, then focuses on Python-based core fusion algorithms including multi-source data preprocessing, spatial registration, and semantic mapping. A four-tier system architecture comprising data layer, fusion algorithm layer, functional application layer, and user interface layer is designed, achieving intelligent real-time coordination of construction progress, quality, safety, and cost. Case validation through a highway bridge project demonstrates that this solution improves construction schedule deviation detection efficiency by 86%, elevates quality defect detection rate to 98%, and reduces safety hazard rectification cycle time by 62%. These advancements significantly enhance the digitalization and intelligence of road and bridge construction management, providing technical references and application paradigms for similar projects.

## Keywords

Python algorithm; Real-scene 3D; BIM technology; Road and bridge construction; Intelligent management

## 基于 Python 算法的实景三维与 BIM 融合在道桥施工智能化研究中的应用研究

胡振程

福建省交建集团工程有限公司, 中国·福建 厦门 361000

## 摘要

针对道桥施工传统管理模式存在的信息不对称、管控精度低、决策滞后等行业的痛点, 本文提出了一种用 Python 算法的实景三维和 BIM 融合技术方案, 并创建了一个以道桥施工全过程为对象的智能化管理体系。文章先对 BIM 技术和实景三维建模的主要原理进行了阐述, 主要研究了基于 Python 的多源数据预处理、空间配准、语义映射等核心融合算法, 设计出包含数据层、融合算法层、功能应用层、用户层的四层系统架构, 实现了道桥施工进度、质量、安全、成本的虚实联动智能化管控。经由某高速公路大桥工程实例检验可知, 该方案可以将施工进度偏差识别效率提高 86%, 质量缺陷检出率提高到 98%, 安全隐患整改闭环时间缩短 62%, 明显提高了道桥施工管理的数字化、智能化水平, 可以给类似工程提供技术参照和应用范式。

## 关键词

Python 算法; 实景三维; BIM 技术; 道桥施工; 智能化管理

## 1 引言

道桥工程是交通基础设施的主要部分, 具有线性跨度大、地质条件差、工序交叉多、野外作业多、安全控制难度大的特点。传统的管理依靠人工巡检、纸质资料和经验决策, 存在进度滞后、质量检测精度低、安全隐患排查不全面、

成本核算失真等问题, 不能满足高质量精细化的要求。BIM 技术在设计施工阶段被广泛应用, 给数字基准赋予了动态的参照物, 但是静态模型不能及时反映现场的动态变化; 实景三维依靠无人机倾斜摄影等手段来再现现场全部要素, 但是缺少工程语义和设计参数, 不能与业务管控对接起来。目前 BIM 和实景三维融合大多只停留在可视化层面, 存在多源数据融合效率低、空间配准精度不高、智能化分析能力不足等问题。Python 由于拥有大量的开源算法库、高效的数值计算以及灵活的二次开发能力, 成为了多源数据融合和智能分析的主要支持工具<sup>[1]</sup>。本文以 Python 为依托, 对实景三维和 BIM 融合技术进行研究, 建立道桥施工智能化管理体

【基金项目】福建省住房和城乡建设科学技术计划项目 (【基金项目】2025-K-137)。

【作者简介】胡振程 (1991—), 男, 中国福建邵武人, 本科, 工程师, 从事市政路桥研究。

系,用工程实例验证其应用价值,为施工数字化转型提供可以落地的技术途径。

## 2 核心技术理论基础

### 2.1 BIM 技术与道桥施工数字化管控

BIM 技术是以三维数字模型为基础,把工程全生命周期的几何信息、物理属性、功能特性、业务数据等所有的信息都整合进来的数字化技术,具有参数化、可视化、协同化的特点。在道桥施工过程中,使用 Civil3D、Revit 等软件可以建立道路线形、桥梁结构、临时设施等全专业参数化的 BIM 模型,进行碰撞检查、施工模拟、工程量核算等基本功能,给施工管理提供标准化的设计端数字基准。但是传统的 BIM 应用大多以静态的设计模型为主,不能及时同步施工现场的动态变化,造成设计与施工相脱离,不能实现全过程的闭环精细化管理。

### 2.2 实景三维建模技术

实景三维建模技术就是用无人机倾斜摄影、地面三维激光扫描等数据采集方式,获取工程现场多角度影像和高精度三维点云数据,然后通过空中三角测量、点云拼接、纹理映射等方式处理得到真实地理坐标、纹理信息的实景三维模型。该技术可以快速、非接触地重建施工现场的地形地貌、工程实体、临时设施等全部动态实景,创建出施工过程的数字孪生体,彻底消除 BIM 模型和现场实景相脱离的现象。实景三维模型只有空间几何和纹理信息,没有工程语义、设计参数、施工工序等业务属性,不能直接对接施工管理的业务流程,不能独立完成精细化管控。

### 2.3 基于 Python 的多源数据融合核心算法

Python 算法是实现实景三维和 BIM 深度融合的重要支撑,开源的专业算法库可以快速解决多源异构数据格式兼容、空间配准、语义映射、智能分析等关键技术问题,主要分为三大类

#### 2.3.1 数据预处理算法

采用 Open3D、NumPy 库对点云数据进行去噪、降采样、格式标准化转换,使用 Pandas 库对施工业务数据进行清洗、结构化存储、关联,解决 BIM 模型、实景点云、施工业务数据异构性问题,为之后融合提供统一的标准化数据基础。

#### 2.3.2 空间配准融合算法

针对 BIM 模型和实景三维模型的坐标系统不一致、精准匹配的要求,用 Python 优化的迭代最近点(ICP)算法,分为粗配准、精配准两步,使两个模型的空间坐标准确对接,配准精度 $\leq 5\text{mm}$ ,满足道桥施工的毫米级控制要求。相比于传统的手工配准方式,算法的自动化程度大大提高了,配准时间比以前缩短了 90% 以上。

#### 2.3.3 语义信息映射算法

用 Python 编写语义映射模块,将 BIM 模型中构件 ID、设计参数、施工工序、质量标准、责任主体等语义信息与实景三维模型中对应的构件空间位置一一对应起来,实现几何信息和业务语义的深度整合,使实景模型具备完整的

工程业务属性,为后续施工智能化管控提供数据支持。

## 3 基于 Python 算法的实景三维与 BIM 融合系统设计

### 3.1 系统总体架构

根据道桥施工业务管理需要及流程特点,本文设计出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合系统,采用分层模块化架构设计,自上而下分为数据层、融合算法层、功能应用层和用户层四个层次,具有高兼容性、高扩展性、高实用性等特点,实现了从数据采集、融合处理到业务应用、决策支持的全流程闭环管理。

### 3.2 核心层级与模块设计

#### 3.2.1 数据层

数据层是系统的根基支撑,把道桥施工全过程的各种异构数据融合起来,主要有三种,分别为 BIM 模型数据、实景三维数据、施工业务数据。一是 BIM 模型数据,即道路线形、桥梁结构、临时设施、安全防护等各个专业的设计模型,包含构件几何信息、设计参数、工程量、施工工序、质量标准等主要数据;二是实景三维数据,即无人机倾斜摄影得到的实景 mesh 模型和地面三维激光扫描得到的工程实体高精度点云数据,按照施工阶段和管控需求动态更新;三是施工业务数据,即进度计划、质量检测报告、安全巡检记录、材料消耗数据、成本核算数据等现场业务数据。所有的数据都会经过 Python 预处理模块的标准化处理,以达到统一存储、调用的目的。

#### 3.2.2 融合算法层

融合算法层是系统的核心,所有的模块都是用 Python 语言编写,是实现实景三维和 BIM 深度融合的重要部分,主要包含四个功能模块,分别是数据预处理模块、空间配准模块、语义映射模块和智能分析模块。数据预处理模块是对多源数据进行格式转换、去噪、清洗、标准化处理,空间配准模块是用优化的 ICP 算法实现 BIM 模型和实景三维模型的空间对齐,语义映射模块是把 BIM 工程语义信息和实景模型空间构件绑定起来,创建虚实联动的数字孪生模型,智能分析模块使用 Python 的 Scikit-learn、OpenCV、YOLO 算法库开发进度偏差识别、质量缺陷检测、安全隐患识别、工程量智能核算等分析算法,实现施工管理数据的自动化分析和智能化预警<sup>[2]</sup>。

#### 3.2.3 功能应用层

功能应用层面向道桥施工核心管理业务,通过融合后的虚实联动模型创建出四个主要的应用模块,对施工全过程进行智能化控制,具体如下

进度智能化管控模块利用实时实景模型和计划进度 BIM 模型的自动比对,用 Python 算法计算各个工序实际完成量与计划量的差异,自动发现进度滞后工序并发出分级预警信息和进度调整建议;

质量智能化管控模块把工程实体的点云数据和 BIM 设计模型进行比对,自动计算出构件尺寸偏差,使用 YOLO

算法找出出现浇结构的蜂窝、麻面、裂缝等外观质量瑕疵，自动生成质量问题清单和整改通知；

安全智能化管控模块，根据实景模型识别出施工现场临边防护缺失、支架搭设不规范、危险区域人员违规进入等安全隐患，与 BIM 安全专项方案模型进行对比，产生分级预警，实现安全隐患闭环管理；

成本精细化管控模块用模型自动计算已完工程实际工程量，与设计工程量、材料消耗量进行实时对比，随时了解材料损耗、费用超支等状况，开展项目成本动态精细化管理<sup>[9]</sup>。

### 3.2.4 用户层

根据道桥施工的管理架构和参与主体，设置分级用户权限，分为项目管理层、现场施工层、监理单位、建设单位，不同的用户根据自己的权限可以访问相应的功能模块和数据信息，从而达到多参与方协同管理、信息共享的目的。

## 4 工程实例应用

### 4.1 工程概况

本文选取某省新建高速公路主线大桥工程作为研究对象，主线全长 2.38km，主桥为 (75+140+75) m 预应力混凝土连续刚构桥，引桥为 12×30m 预制箱梁，桥梁跨越河谷地带，地形地质条件复杂，施工工序交叉多，高空作业、水下作业风险大，对施工管理精度和效率有很高的要求。传统的管理模式存在着进度控制滞后、质量检测效率低、安全隐患排查不全面等缺点，因此本文设计出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合系统，对施工全过程进行智能化管理。

### 4.2 应用实施流程

#### 4.2.1 多源数据采集与预处理

利用 Civil3D、Revit 软件建立项目全专业 BIM 模型，包含道路、桥梁、临时设施、安全防护等所有构件，完整输入设计参数、施工工序、质量标准等语义信息；其次用大疆 M300RTK 无人机搭载五镜头相机，按每月一次的频率对全场倾斜摄影数据进行采集，对桥梁主梁、墩柱等重要部位采用地面三维激光扫描仪进行毫米级点云数据采集，获得施工现场动态实景三维数据；同时采集施工进度、质量、安全、成本等全过程业务数据<sup>[4]</sup>。所有的数据都会经过 Python 预处理模块的标准化处理，从而给模型融合提供数据基础。

#### 4.2.2 模型融合及系统部署

使用本文基于 Python 开发的融合算法，对 BIM 模型和实景三维模型进行空间配准和语义映射，创建项目虚实联动的数字孪生模型，完成融合系统本地化部署，开通各个参与方的分级用户权限，使系统正式上线运行<sup>[9]</sup>。

#### 4.2.3 全流程业务应用

即在项目施工全过程里，用融合系统进行进度、质量、安全、成本的智能化控制。进度管控时，每月用实景模型和 BIM 进度计划模型自动对比，找出进度偏差并及时调整施工计划，在质量管控时，对预制箱梁、现浇梁段进行点云扫描，和 BIM 模型比对检测尺寸偏差，识别外观质量缺陷，在安全管控时，用实景模型识别支架搭设、临边防护等环节

的安全隐患，自动发出预警，在成本管控时，根据融合模型按月核算已完工程量，准确控制材料消耗和成本支出。

## 5 应用效果分析

### 5.1 施工管理效率得到飞跃式提高

就进度控制而言，传统的手工现场巡检、进度核算需要 7 天才能完成，但是系统自动比对分析只需要一天就可以完成，进度偏差识别效率提高了 86%，有效地避免了工期滞后风险；就质量、安全控制来说，质量缺陷检出率由原来的 82% 提高到 98%，安全隐患整改闭环时间由原来的平均 72h 缩短到现在的 27h，缩短幅度达到 62%，大大提高了项目管控的效率和精度。

### 5.2 项目经济效益大为提高

经过成本精细化控制，项目钢筋、混凝土等主材损耗率由原来的 4.5% 降低到现在的 1.3%，节约了 3.2 个百分点，累计节约材料费用 286 万元，减少现场管理人工支出 18%，总体效益明显。

### 5.3 多主体协同管理能力明显增强

利用融合系统之后，建设单位、施工单位、监理单位可以共同在同一个模型上开展协同工作，消除了信息不对称的情况，施工过程中涉及的设计变更、工序交接、问题整改等环节的流转效率提升超过 70%，项目的管理工作变得更加透明、规范、标准。

## 6 结语

本文针对道桥施工传统管理模式的核心痛点，提出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合技术方案，建立道桥施工智能化管理体系，用工程实例验证该方案的可行性、有效性。研究表明，Python 算法可以很好地解决实景三维和 BIM 多源数据融合的技术难题，融合后的虚实联动模型可以实现道桥施工进度、质量、安全、成本全流程智能化管控，大大提高了施工管理的效率和精细化程度，给道桥工程数字化转型提供了一种可复制、可落地的应用范式。

未来研究会不断优化多源数据融合算法，把深度学习、数字孪生技术加入进去，对施工过程中出现的风险展开动态预估和智能决策，将融合模型运用到道桥工程运维当中，实现工程整个生命周期的数字化、智能化管理。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程施工安全技术规范 JTG F90-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 崔志勇, 吕春磊, 王艳晗, 等. BIM 正向设计在道路工程全生命周期中的应用研究[J]. 北方交通, 2022, (03): 54-57.
- [3] 常伟斌. BIM+GIS+无人机技术在高速公路改扩建全周期管理中的应用实践[J]. 运输经理世界, 2025, (28): 36-38.
- [4] 菅云硕, 范文杰, 许海丰, 等. 铁路工程 BIM 模型轻量化技术研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(05): 99-104.
- [5] 马遥. 公路互通匝道桥梁 BIM 建模方法研究与应用[J]. 山西建筑, 2021, 47(05): 9-14.

# Optimization Design of Anti-interference Algorithm for Wireless Communication in Urban Rail Transit CBTC System

Zhengfeng Lu

Urumqi Urban Rail Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

The Communications-Based Train Control (CBTC) system serves as the core backbone for the efficient operation of urban rail transit. Its wireless communication links are responsible for transmitting critical data between trains and ground control centers. The electromagnetic environment in urban rail transit scenarios is complex, with challenges such as co-channel interference and multipath interference posing serious threats to the stability and reliability of CBTC system communication, thereby endangering the safety of train operations. This paper focuses on the anti-interference requirements of CBTC system wireless communication. It first analyzes the types of interference sources and the shortcomings of existing anti-interference algorithms. Then, it proposes algorithm optimization design schemes for the physical layer, protocol layer, and network layer, including adaptive spread spectrum algorithms, dynamic spectrum allocation algorithms, and cross-layer cooperative anti-interference algorithms. Theoretical analysis shows that the optimized algorithm system can accurately perceive, dynamically avoid, and actively defend against interference, effectively enhancing the communication robustness of the CBTC system in complex electromagnetic environments and ensuring the safe and efficient operation of urban rail transit.

## Keywords

CBTC system; wireless communication; anti-interference algorithm; optimization design

# 城市轨道交通 CBTC 系统中无线通信抗干扰算法的优化设计

路正凤

乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司, 新疆乌鲁木齐, 830000

## 摘要

通信基础的列车控制系统 (CBTC) 乃城市轨道交通高效运行的核心依托, 其无线通信链路执行列车与地面控制中心关键数据的传输任务。城市轨道交通场景的电磁环境状况繁杂, 同频干扰、多径干扰等难题, 对 CBTC 系统通信的稳定性和可靠性构成严重威胁, 进而危及列车运行安全。本文聚焦 CBTC 系统无线通信抗干扰需求, 先剖析干扰源种类及现存抗干扰算法缺陷, 然后针对物理层、协议层、网络层三个维度提出算法优化设计方案, 含有自适应扩频算法、动态频谱分配算法和跨层协同抗干扰算法, 由理论分析表明, 经优化的算法体系能精准感知干扰、动态规避干扰以及主动防御干扰, 切实增强 CBTC 系统在复杂电磁环境中的通信稳健性, 保障城市轨道交通安全高效运行的技术。

## 关键词

CBTC 系统; 无线通信; 抗干扰算法; 优化设计

## 1 引言

城市化进程不断提速, 大运量、高准时性优势让城市轨道交通成缓解交通拥堵核心手段。CBTC 系统为现代轨道交通的核心控制环节, 借助无线通信技术对列车位置、速度等关键数据进行实时传输, 支持列车精准调度及安全操控, 是提升线路运输效率的关键技术支持。无线通信链路成为 CBTC 系统的“神经网络”, 通信质量直接影响列车运行的安全与高效, 城市轨道交通的无线通信环境复杂程度高, 地铁隧道、高架线路等不同场景的地形特点, 以及列车行驶产

生的动态电磁辐射, 导致无线信号面临多径传播、信号衰减等天然阻碍, 城市中密集分布的公共无线网络、民用电子设备、高压电力设施等, 跟 CBTC 系统形成频率资源竞争, 引发同频干扰、邻频干扰等问题不断出现。

## 2 CBTC 系统无线通信干扰源与干扰机制

### 2.1 干扰源分类

CBTC 系统无线通信干扰源分内部干扰、外部干扰两类, 内部干扰主要来自轨道交通系统自身的无线及电气设备, 核心干扰源是 CBTC 系统跟 PIS 系统频段的重叠, 二者共享无线频谱资源易起信号冲突; 列车运行阶段, 牵引系统、制动系统这类电气设备会产生电磁辐射现象, 引发对车载无线通信设备的近距离干扰。外部干扰来自城市复杂的电磁环境,

【作者简介】路正凤 (1988-), 女, 中国甘肃靖远人, 硕士, 工程师, 从事城市轨道交通通信信号研究。

涵盖同频干扰与异频干扰，同频干扰大多由公共 Wi-Fi、蓝牙这类民用无线设备造成，众多此类设备聚焦于 2.4GHz 等开放频段，跟 CBTC 系统的传统工作频段有重叠，引发信号叠加以及误码率攀升；高压电力线路、微波炉等设备的电磁辐射引发异频干扰，其生成的杂散信号可能会侵入 CBTC 通信频段，城市里的高楼建筑以及隧道壁等地理环境会引起信号多径传播，引发多径干扰，影响信号接收成效<sup>[1]</sup>。

## 2.2 主要干扰机制

同频干扰核心机制是多发射机同频段同时传信号，致使接收端无法精准区分有用信号与干扰信号，导致信号叠加出现失真，鉴于 2.4GHz 频段具备开放性与兼容性长处，为大量民用设备所应用，不过 CBTC 系统于该频段的通信信号功率不高，易遭其他强信号压制，导致数据传输出错。多径干扰形成机制为无线信号传播时经不同路径接收端，不同路径信号的传播时间跟相位存在差异，令接收端信号叠加后产生衰落现象，在地铁隧道当中，信号容易在隧道壁跟列车车体之间多次反射，形成众多多径信号，严重之时会引发符号间干扰，妨害通信的连贯性。邻频干扰由相邻频段信号泄漏引发，当其他无线系统频段与 CBTC 系统频段为邻时，信号或借滤波欠佳设备闯入目标频段，此干扰强度比同频干扰低，可是会引起信号信噪比减小，长时间积攒易导致通信链路不稳，互调干扰多出现于非线性器件里，多个不同频率的信号同时走入通信设备的放大器、滤波器等部件，会出现新的干扰频率，若该频率落入 CBTC 通信频段，会直截影响信号传输质量。

## 3 CBTC 系统现有无线通信抗干扰算法局限

### 3.1 物理层抗干扰算法缺陷

当下物理层抗干扰技术大多采用固定参数配置，欠缺动态适应性，直序扩频 (DSSS) 技术为常用抗干扰手段。凭借扩展信号带宽提升抗干扰性能，传统 DSSS 技术采用固定的扩频码以及扩频增益，不能依照干扰强度灵活调整，当面对强窄带干扰情况时，固定扩频增益难保障信号解析程度；在弱干扰环境时，扩频增益过高将降低频谱利用率，智能天线技术应用存局限，当下自适应阵列天线波束成形算法的响应速度偏慢，难以跟进高速移动列车及动态变动干扰源。在列车高速行驶的情景里，干扰源位置强度迅速变动，波束成形算法有滞后性，干扰抑制就会不及时，降低通信品质。

### 3.2 协议层抗干扰机制不足

协议层干扰协调机制灵活性欠佳，现有动态频率选择 (DFS) 算法大多凭借预设信道列表做切换，未全面顾及 CBTC 系统的实时通信需求，当察觉到干扰情况时，算法一般会选定空闲信道去切换，然而没有评估新信道信号质量及潜在干扰风险，或许会造成信道的频繁切换，引发通信中止，纠错编码技术适配效果差，传统卷积码、Turbo 码等编码方式，编码效率与抗干扰性难兼顾，针对复杂干扰情形下，要

增强抗干扰力应增大编码冗余度，然而这会让数据传输速度降低，与 CBTC 系统实时性要求相抵触。

### 3.3 网络层协同抗干扰缺失

多数现有抗干扰算法聚焦单一技术方面，没有物理层、协议层以及网络层的协同机制，物理层信号优化没法跟协议层信道切换有效协同，网络层进行资源分配时未考量底层干扰状态，致使抗干扰效果显著变差，物理层级探测到强干扰之后，若未及时让协议层知晓切换信道，仅凭借扩频技术难以全然规避干扰。网络层干扰预测能力差，目前算法多数采用被动防御策略，只在干扰出现后加以应对，缺少对干扰趋势的预判能力，在城市地铁高峰阶段，无线设备使用频次高，干扰强度呈规律变动，被动防御策略不能预先调校系统参数，引发抗干扰响应滞后。

## 4 CBTC 系统无线通信抗干扰算法优化设计

### 4.1 物理层：自适应扩频与智能波束成形优化

#### 4.1.1 自适应扩频算法

依靠干扰感知的自适应扩频算法，核心要点是按照实时干扰强度动态调控扩频参数，算法依靠接收端的干扰检测模块，一直监测通信频段内干扰信号的强度及类型。构建干扰强度等级评定体系，当察觉弱干扰出现时，采用低扩频增益与短扩频码，提高频谱利用率且保障抗干扰能力；遭遇中强度干扰的情况下，切换为中等扩频增益，平衡好抗干扰能力及传输速率；当遭遇强窄带干扰或恶意干扰时，自动启用高扩频增益及长周期伪随机码，借由大幅扩张信号带宽降低干扰作用。算法采用扩频码动态选择机制，按照干扰类型选取不同特性的 PN 码，应对窄带干扰状况，择取尖锐自相关的 PN 码，增大信号解扩之后的信噪比；应对宽带干扰，采用正交性佳的 PN 码，降低多用户之间的相互干扰，算法可实现扩频模式灵活转换，可依据干扰场景在直序扩频 (DSSS) 同跳频扩频 (FHSS) 间自动适应切换，增强对复杂干扰的适应力<sup>[2]</sup>。

#### 4.1.2 智能波束成形优化算法

智能波束成形算法经优化后添入动态跟踪机制，增强对移动干扰源的响应速率，算法融合列车 GPS 定位讯息与信号到达角估量，实时预估列车行驶轨迹与干扰源位置变动，事先调整天线波束朝向，采用自适应迭代的算法，降低波束成形计算时延，确保列车高速运行之际仍可精准跟踪预期信号方向，排除干扰信号。算法结合多目标优化策，同时增强期望信号的增益，最大程度提升干扰信号抑制比，形成波束成形的目标函数，全面考量信号强度、干扰抑制成效与天线能耗，做到多维度性能协调，针对地铁隧道等多径干扰严重的情形，算法造出多个波束对准不同路径信号，完成多径信号的有效整合，增进信号接收质量<sup>[3]</sup>。

### 4.2 协议层：动态频谱分配与自适应纠错编码优化

#### 4.2.1 动态频谱分配算法

依靠干扰预测的动态频谱分派算法，对历史干扰数据

与实时电磁环境信息展开分析,构建干扰预测模型,算法采用时间序列分析法,探寻干扰强度变化规律,提前预估未来一段时间内干扰的分布态势。按照CBTC系统通信需求的优先级,对关键控制数据赋予抗干扰能力更强的频段,把常规频段分给非关键数据,实施频谱资源的差异化式管理。算法纳入信道质量评估机制,切换信道之前,要对候选信道的信号衰减、干扰水平等参数做全面评估,择取最优通信路径,构建信道切换协商体系,让列车与地面控制中心的信道切换同步进行下去,防止因切换不及时引发通信中断,针对5.8GHz等优良频段,算法凭借动态功率控制,保障信号覆盖,同时降低发射功率,减轻对其他系统造成的干扰。

#### 4.2.2 自适应纠错编码算法

经优化的自适应纠错编码算法依据干扰强度与数据类型来动态调整编码方案,算法确立编码效率跟抗干扰性能的映射关系,当干扰程度较弱之际,采用高效编码的卷积码,提高数据传送速度;若干扰力度增强,自动切换成Turbo码或LDPC码等强抗干扰编码模式,借增添编码冗余度增强数据容错力。针对不同类型的CBTC系统数据,算法采用差异化编码方式,针对列车速度、位置等关键控制数据,采用双重纠错编码举措,保障数据传输的精准度;针对设备状态监测等非关键数据,采取兼顾编码效率和抗干扰性能的方案,降低系统消耗,算法可实时调变编码参数,凭借接收端反馈消息,动态优化编码长度与校验模式,适配干扰环境的动态转变<sup>[4]</sup>。

## 5 优化算法的理论验证与应用展望

### 5.1 理论验证

就抗干扰性能而言,自适应扩频算法灵活变动扩频参数,做到了干扰强度与抗干扰策略的精准搭配,与固定扩频算法相较,强干扰环境中的误码率明显降低,弱干扰环境中频谱利用率上涨超30%,智能波束成形优化算法借由动态跟踪机制,把波束成形响应时间缩短到毫秒级,可高效应对高速移动场景的动态干扰,多径干扰抑制效果增长40%。动态频谱分配算法借由干扰预测及信道评估,减少了信道的无效切换次数,信道切换成功率攀升至99%以上,通信中断时段大幅缩短,自适应纠错编码算法据数据类型及干扰状态优化编码方案,保证关键数据传输的准确性,非关键数据

的传送速率提升25%,跨层协同算法凭借多层面技术融合,达成了抗干扰能力的协同强化,跟单一维度算法相比,系统通信的鲁棒性增强50%以上。

### 5.2 应用展望

优化算法在城轨多种场景中有着广阔应用前景,针对地铁隧道情形时,智能波束成形与自适应扩频相结合的算法,能有效抑制多径干扰以及隧道内电气设备干扰,保证列车在隧道中的连贯通信;针对高架线路场景中,动态频谱分配算法可防止地面民用无线设备受干扰,增进信号传输稳定性。因5G、人工智能等技术发展,未来可进一步改进算法效能,把人工智能算法深入嵌入干扰预测模块,提高干扰预测的精准度与提前度;与5G毫米波通信技术相结合,增加CBTC系统通信频段数量,从源头上减少干扰隐患;采用区块链技术维护抗干扰策略的安全,防范恶意干扰者破解算法参数<sup>[5]</sup>。

## 6 结语

城市轨道交通CBTC系统的无线通信抗干扰力保障列车安全高效运行,本文对CBTC系统无线通信干扰源类型及干扰机制展开分析,点明现有抗干扰算法在自适应能力、协同性等方面存在局限,就这些问题而言,针对物理层、协议层、网络层三个维度去设计优化算法体系:自适应扩频与智能波束成形算法增强了物理层应对动态干扰的能力;协议层动态频谱分配及自适应纠错编码算法,优化资源利用和数据容错力,网络层的跨层协同算法达成了多层面技术的协同增效。

### 参考文献

- [1] 李春.城市轨道交通基于通信的列车控制系统车地无线通信优化方案[J].城市轨道交通研究,2011,14(9):5.
- [2] 王浩明.基于通信的城市轨道交通类车控制系统车地无线通信优化设计[J].通讯世界,2016(2):1.
- [3] 弓剑.城市轨道交通点式列车自动保护下的防闯功能及站台屏蔽门联动功能的优化设计[J].城市轨道交通研究,2015,18(3):4.
- [4] 郑生全,朱东飞,李东.CBTC降级及后备运营系统方案与优化设计[J].铁道通信信号,2014.
- [5] 郑生全,宋继承,李冬,ZhengShengquan,SongJicheng,LiDong.CBTC降级及后备运营系统方案与优化设计[J].城市轨道交通研究,2014,17(z2).